

SystemX
INSTITUT DE RECHERCHE
TECHNOLOGIQUE

Les cahiers de la
**TRANSFORMATION
NUMÉRIQUE**

#2

Sélection de résultats emblématiques

Sommaire

3 Editos

- **Michel Morvan**
Président, IRT SystemX
- **Paul Labrogère**
Directeur Général, IRT SystemX

4 Concevoir le monde numérique de demain

- **Amira Ben Hamida**
Cheffe de projet et Référente de la thématique Économie circulaire et transition écologique, IRT SystemX
- **Loïc Cantat**
Responsable de l'équipe Science des données et IA, IRT SystemX

6 Interconnecter les offres entre opérateurs de covoiturage grâce à la technologie blockchain

7 Évaluer la robustesse des modèles de conduite des véhicules autonomes

8 Accompagner les territoires dans leur transition écologique

10 Assurer la cybersécurité des systèmes de production industriels

12 Expérimenter les interfaces homme-machine pour accompagner les conducteurs de véhicules automatisés

14 Simuler le processus de fabrication additive pour optimiser ses performances

16 Accompagner l'ingénierie collaborative des grands systèmes complexes

18 Cibler les usages pour concrétiser la conduite du changement

19 Personnaliser l'expérience de mobilité des voyageurs

20 Optimiser l'exploitation des voies réservées au covoiturage

21 Développer des réseaux de télécommunications mobiles de plus en plus performants

22 Améliorer l'agilité des processus de conception des systèmes complexes

24 Concevoir des systèmes à base d'intelligence artificielle de confiance

28 Imaginer le monde numérique de demain

- **Georges Hébrail**
Responsable de l'axe scientifique Science des données et interaction, IRT SystemX

30 Relever les défis de cybersécurité des systèmes de transport connectés et intelligents

31 Engendrer un double impact sur la science et l'industrie

32 Planifier les infrastructures et les services de mobilité et de logistique

34 Accompagner la conception des pièces et des systèmes mécaniques grâce à l'optimisation topologique

36 Accompagner des parcours remarquables

37 Un cadre propice à la formation doctorale

38 Des parcours remarquables



Michel Morvan
Président, IRT SystemX



Paul Labrogère
Directeur général, IRT SystemX

L'édition #2 des Cahiers de la transformation numérique démontre une fois de plus la vitalité de l'Institut de recherche technologique (IRT) SystemX, au travers du nombre et de la qualité des résultats présentés. Ces derniers sont le fruit du travail de femmes et d'hommes de talent, collaborateurs de l'institut mais également partenaires académiques, industriels et institutionnels. Ensemble, ils dessinent un monde plus sûr, plus performant et plus durable.

Le monde est en perpétuelle évolution et celle-ci s'accélère. Il nous faut prendre en compte les grandes transitions, maîtriser la complexité et faire face à l'incertitude, comme lors de la crise pandémique que nous venons de traverser. Ce contexte rend nécessaire et urgente la transformation de nos organisations. Il en va de leur compétitivité et de leur pérennité. La transformation numérique en est le meilleur levier. Et, j'en suis convaincu, nous avons les moyens de faire de la France la championne de cette transformation au profit de l'industrie, des services et des territoires.

Aujourd'hui l'IRT SystemX adresse des thématiques telles que les mobilités du futur, le transport autonome connecté, l'économie circulaire et la transition écologique, l'entreprise étendue, la fabrication additive, les systèmes industriels du futur ou encore la sécurité numérique. Le programme Confiance.ai, entrepris en 2021, mis en œuvre dans le cadre du Grand défi « Sécuriser, fiabiliser et certifier des systèmes fondés sur l'intelligence artificielle » et de France 2030, donne aussi déjà de beaux résultats.

Vous en découvrirez de nombreuses illustrations dans les pages qui suivent. Aujourd'hui, nos ingénieurs-chercheurs et ingénieures-chercheuses collaborent avec nos partenaires pour produire des impacts au bénéfice de la santé et du parcours patient, de l'agriculture et de la production alimentaire, de l'économie circulaire, de l'éducation... que nous serons en mesure, je l'espère, de vous présenter lors d'une prochaine édition de ces cahiers.

Je suis fier de vous partager cette nouvelle édition des Cahiers de la transformation numérique. Vous y découvrirez nos impacts les plus emblématiques. Ils concrétisent notre stratégie affirmée en particulier dans les domaines de la cybersécurité, des jumeaux numériques et de l'IA de confiance.

Parmi les premiers résultats du programme Confiance.ai, nous mettons en avant la livraison de la première version d'un environnement de confiance, en cours de déploiement dans les ingénieries de nos partenaires industriels ; ainsi que la conception de DebiAI, plateforme de mise en qualité des jeux de données à des fins d'utilisation dans des modèles d'apprentissage. Aujourd'hui, les jumeaux numériques sont partout, accessibles au grand public dans le *metaverse* ou facilitant la collaboration dans l'entreprise étendue. Ils représentent également un puissant outil d'aide à la décision pour les industries comme pour les territoires. Ils peuvent accompagner les décideurs publics comme l'illustre le démonstrateur Decarbonized City, ou encore aider à la consolidation des flux de logistique urbaine comme expérimenté au sein du projet européen LEAD. Transverse à une grande partie de nos projets, la cybersécurité est quant à elle au cœur de la sécurisation des systèmes industriels. Notre plateforme CHES4Industries propose un catalogue d'attaques exploité notamment dans le cadre du projet européen H2020 SeCoIIA (*Secure Collaborative Intelligent Industrial Assets*).

Tous ces nouveaux impacts, ces plateformes et démonstrateurs, viennent enrichir nos environnements technologiques, véritables laboratoires ouverts à nos partenaires. Si nous sommes aujourd'hui impliqués au sein de plusieurs projets européens d'envergure, c'est parce qu'ils peuvent bénéficier du potentiel de ces environnements. Ce document est l'illustration même de l'efficacité de notre « modèle de recherche à double impact simultané », caractérisé par l'étude que nous avons menée en collaboration avec le Centre de Gestion Scientifique (Mines Paris – PSL) et qui vous est présentée dans ces pages. Je vous en souhaite bonne lecture !

L'IRT SystemX propose un modèle unique au service de l'industrie pour accélérer les impacts et transferts de technologies dans de nombreux domaines. Parmi eux : l'intelligence artificielle, l'économie circulaire et la transition énergétique. Focus sur les activités de l'institut dans ces domaines avec Loïc Cantat et Amira Ben Hamida.

Concevoir

le monde numérique de demain



Loïc Cantat
Responsable de l'équipe Science
des données et IA, IRT SystemX



Amira Ben Hamida
Cheffe de projet et Référente de la thématique Économie
circulaire et transition écologique, IRT SystemX

À quels grands enjeux est aujourd'hui confronté le secteur de l'intelligence artificielle (IA) ?

Le secteur, historiquement animé par la création de démonstrateurs, entre aujourd'hui dans une nouvelle ère : celle de l'industrialisation des processus, avec l'objectif de construire des composants d'IA destinés aux produits industriels. Les méthodes et outils exploités actuellement ne sont pas adaptés. Pour y remédier, les enjeux sont doubles : la construction d'un environnement de confiance dans ces systèmes et l'accélération de l'acceptabilité de ces systèmes par la société et par les industries. Les verrous scientifiques à lever afin d'apporter des solutions tangibles, applicables à très large échelle, touchent les domaines de l'ingénierie système, de la science des données et de l'interaction. Le programme Confiance.ai, piloté par l'IRT SystemX, œuvre à construire cet environnement de confiance en s'intéressant à une multitude de sujets tels que les interactions homme-machine, l'explicabilité, la robustesse et la sûreté, ou encore les normes et standards.

Qu'apporte l'IRT SystemX sur la problématique de l'IA ?

Par son positionnement à la croisée des mondes industriels et académiques, l'institut exploite des données réelles et investit des cas d'usages industriels concrets afin d'adapter et de mettre en pratique les travaux scientifiques du secteur. Notre IRT est multidisciplinaire et nous permet de creuser l'ensemble des champs liés à l'hybridation de l'IA en combinant nos compétences dans les domaines de la simulation physique, des interactions homme-machine, de la sûreté de fonctionnement ou encore de l'ingénierie système. Nous avons la capacité de coupler l'IA avec d'autres champs scientifiques pour l'intégrer à des systèmes industriels complexes. Parmi nos plus importantes contributions dans ce domaine, nous pouvons citer :

- L'hybridation des processus de simulation physique industriels couplée aux méthodes d'apprentissage à partir des données d'observation ou de simulation. Ces travaux ont été menés au sein du projet HSA (Hybridation Simulation Apprentissage) de l'IRT SystemX, lancé dans le cadre de son programme IA2 (Intelligence Artificielle et Ingénierie Augmentée) et ont déjà bénéficié d'une reconnaissance auprès de la communauté du calcul scientifique avec l'obtention du Trophée de la simulation, catégorie Codesign lors du forum Teratec 2022.
- La livraison de la première version d'un environnement de confiance en cours de déploiement dans les ingénieries de nos partenaires industriels. Nous contribuons également à la mise en place de normes pour répondre à la directive européenne « AI Act » en cours de rédaction.

Comment l'IRT SystemX a-t-il investi la thématique de l'économie circulaire et de la transition écologique ?

La genèse de notre implication se retrouve dans le lancement de plusieurs projets de R&D autour des problématiques de l'efficacité énergétique, de la prédiction et de l'utilisation de l'intelligence artificielle, avec l'ambition de rendre les usages de tous plus respectueux de l'environnement. Ces projets s'appuient sur les plateformes et les compétences des forces vives de l'IRT SystemX dans les domaines de l'ingénierie système, de l'IA, de l'optimisation et de la recherche opérationnelle, de la blockchain et de la sûreté de fonctionnement. Nous avons souhaité pousser les murs pour travailler de façon systémique sur ces sujets en nous intéressant en parallèle à plusieurs visions portées par l'ensemble de nos partenaires. Pour cela, nous avons mis en place un observatoire des systèmes en partenariat avec des acteurs nationaux et européens afin d'identifier les verrous scientifiques et technologiques rencontrés par les industriels et les académiques.

Pouvez-vous nous en dire plus sur l'observatoire des systèmes que vous avez mis en place ?

Lancée en juin 2021, cette démarche a permis d'établir un état de l'art en menant des interviews avec un ensemble d'acteurs du domaine. Nous avons identifié un certain nombre de sujets au cœur de leurs priorités : l'optimisation énergétique, l'accompagnement des changements, l'hydrogène, la sobriété numérique et responsable, l'économie circulaire et le recyclage, les approches intégrées (*smart city*, *supply chain*, etc.) et la gestion de l'eau. Cet état de l'art a permis de faire ressortir des synergies entre différents acteurs qui interviennent sur les chaînes de valeurs de ces sujets. Depuis, nous avons initié le montage de plusieurs projets R&D collaboratifs pour les accompagner dans la proposition de solutions durables et résilientes.

Pouvez-vous nous parler d'une réalisation emblématique de l'institut dans ce domaine ?

La création de Decarbonized City. Il s'agit d'un démonstrateur de planification territoriale basée sur la gestion des données et des jumeaux numériques simulables. Concrètement il permet aux élus de prendre des décisions responsables d'un point de vue environnemental tout en veillant à un équilibre économique et à la satisfaction des citoyens. C'est aussi un bel exemple de collaboration entre SystemX, une PME (Cosmo Tech) et une collectivité, (l'agglomération Paris-Saclay).



Interconnecter les offres entre opérateurs de covoiturage grâce à la technologie blockchain

L'IRT SystemX a conçu, en collaboration avec Ridygo et la Métropole de Lyon, une technologie d'interopérabilité rendant possible l'interconnexion entre plusieurs opérateurs de covoiturage. Son ambition : permettre aux opérateurs de coordonner les offres avec les demandes de leurs communautés d'utilisateurs.

Cette plateforme est supportée par une technologie blockchain dédiée au consortium d'opérateurs. Les travaux réalisés sont nombreux : les modèles de données ont été unifiés, des outils de cryptographie avancée ont été implémentés afin de garantir un niveau de confidentialité élevé et des expérimentations ont été réalisées en conditions réelles d'exploitation.

La technologie a été mise en open source afin d'initier une large dynamique de fédération des opérateurs de covoiturage.



Cette technologie inédite permet de consolider l'offre de covoiturage, mais aussi de crédibiliser le service auprès des citoyens en valorisant la richesse des services existants à l'échelle d'un territoire.

Yann Briand,
Chef de projet et Responsable
de la thématique Mobilités du futur,
IRT SystemX

INTERVIEW



Arnaud Delcasse
Dirigeant fondateur,
COOPGO (Ridygo)

Quels sont les freins inhérents au développement de l'offre de covoiturage ?

Le développement du covoiturage est une problématique complexe, qui nécessite de travailler en parallèle sur la sensibilisation des usagers, le changement de comportement et sur l'offre permettant aux usagers d'être mis en relation. Aujourd'hui, les trajets de covoiturage du quotidien (domicile-travail notamment) sont fragmentés entre plusieurs opérateurs et différentes offres. Nous pensons qu'une solution est la levée des freins à l'interopérabilité entre plateformes de covoiturage, ou entre un système de MaaS (mobilité multimodale servicielle) et les opérateurs de covoiturage, afin de faciliter les échanges, massifier l'offre et augmenter les ressources sur l'accompagnement au changement de comportement.

Comment la technologie blockchain peut-elle soutenir la collaboration entre les différents opérateurs de covoiturage ?

L'objectif de nos travaux menés avec l'IRT SystemX était de faciliter les mises en relation en covoiturage

inter-plateformes afin de proposer une expérience utilisateur fluide, sans avoir à installer plusieurs applications. Chaque opérateur peut ainsi se concentrer sur son expérience utilisateur tout en bénéficiant d'une base de trajets permettant de répondre aux besoins. La blockchain permet de lever des freins techniques relatifs au paiement entre opérateurs et sert de tiers de confiance dans la relation entre les différentes parties prenantes.

Quels bénéfices tirez-vous de votre collaboration avec l'IRT SystemX ?

En travaillant aux côtés de l'institut, nous avons pu expérimenter concrètement ce mode de fonctionnement que nous portons aujourd'hui auprès des autres acteurs dans le cadre d'un processus de standardisation. Nous sommes heureux d'y avoir contribué et de le voir publié sous licence open source pour le faire évoluer et l'intégrer au sein de nos offres de covoiturage de MaaS.



Évaluer la robustesse des modèles de conduite des véhicules autonomes

L'IRT SystemX a produit, en collaboration avec APSYS (Airbus), Expleo, Naval Group et sa filiale SIREHNA, et Stellantis, un démonstrateur inédit : Robust-AI (ROBUSTness toolkit in AI). Cet outil agrège des approches par simulation et des théories mathématiques basées sur les méthodes formelles pour évaluer la performance et la sécurité des pilotes de conduite autonome.

Les fonctions décisionnelles à base d'intelligence artificielle, et plus particulièrement de deep learning, doivent satisfaire des exigences de sûreté de fonctionnement et donc de démonstration de leur fiabilité dans un domaine opérationnel donné. La solution développée est composée de briques technologiques permettant

des avancées significatives pour cette évaluation. Les travaux menés ont permis à l'institut de proposer au monde industriel et à la communauté scientifique du domaine une approche unique, combinant sûreté de fonctionnement¹ et preuves formelles dans le cadre d'une conduite autonome résultant d'un modèle appris par reinforcement learning².



Notre démonstrateur intègre les premières briques d'une méthodologie permettant d'évaluer les propriétés de robustesse d'un modèle de reinforcement learning d'un pilote autonome, tout en répondant aux exigences de la sûreté de fonctionnement inhérentes au véhicule autonome. Il est en cours de transfert vers nos partenaires et ses perspectives de réutilisation et d'évolution sont prometteuses.

Hatem Hajri,
Ingénieur-chercheur Architecte IA,
IRT SystemX

INTERVIEW



Patrick Boutard
AI trust, safety
and compliance Lead,
Stellantis

Quel était l'objet des travaux que vous avez menés avec l'IRT SystemX ?

Dans le cadre de l'utilisation de l'IA et de l'apprentissage statistique pour les systèmes d'aide à la conduite (ADAS) et pour le véhicule autonome, Stellantis a identifié dès 2017 que la robustesse de ses algorithmes devait être travaillée et optimisée à la fois pour la qualité de la prestation et la sûreté de fonctionnement. Nous avons décliné cette question selon deux axes : un axe théorique orienté validation formelle avec analyse de la couverture opérationnelle, et un axe de méthodologie pratique de robustification de l'apprentissage et de l'évaluation des performances avec la prise en compte de cas improbables. Ces corner cases sont importants car le domaine de conception est loin de couvrir le domaine opérationnel typique : les événements les plus inattendus peuvent se produire sur la route !

Quels principaux résultats avez-vous retirés de votre collaboration ? Comment avez-vous prévu de les réutiliser au sein du groupe Stellantis ?

Comme escompté dès le départ, l'axe théorique a été ardu, et, en dépit d'avancées, la vérification formelle reste encore une question ouverte. L'axe pratique nous a permis, par le couplage d'attaques adverses et d'apprentissage par renforcement, de progresser significativement sur la robustification des apprentissages. Un ensemble d'indicateurs de performance et de safety ainsi qu'un environnement de simulation complètent les livrables et permettent une mise en œuvre opérationnelle dans le cadre de nos études de développement.

1. Norme Safety ISO/PAS 21448:2019 SOTIF
2. Apprentissage par renforcement



Accompagner les territoires dans leur transition écologique

L'IRT SystemX a développé, en partenariat avec Cosmo Tech, un démonstrateur de planification territoriale intitulé Decarbonized City, basée sur la gestion des données et les jumeaux numériques. Son objectif est d'aider les collectivités à prendre des décisions éclairées grâce à l'évaluation de l'impact de leurs projets sur le territoire et le suivi d'indicateurs de performance clés.

Ce démonstrateur novateur se base sur une modélisation et une simulation de jumeaux numériques permettant de générer des scénarios « what-if » dédiés au déploiement d'infrastructures énergétiques et d'en extraire des indicateurs sur la pertinence des aménagements et les portées des stratégies. Il s'agit de l'une des premières applications au monde à exploiter la plateforme de Microsoft « Azur Digital Twin ».

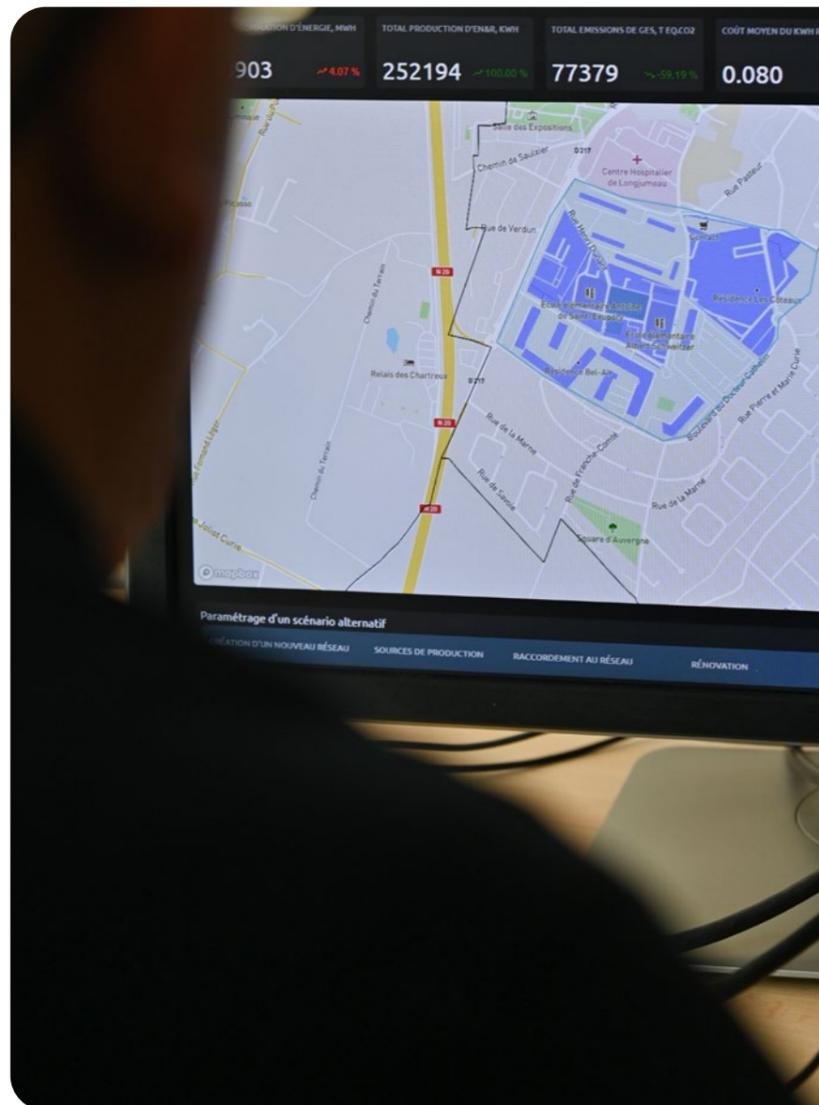
Avec Decarbonized City, l'IRT SystemX a notamment accompagné l'agglomération de Paris-Saclay dans sa transition écologique en élaborant son jumeau numérique, réplique virtuelle des 27 communes qui la composent, construit à partir de données variées (configuration du territoire, données cadastrales, bâtiments, réseaux énergétiques, etc.). Les élus peuvent ainsi mesurer l'impact énergétique exact des futurs projets d'aménagement du territoire et opérer les choix les plus pertinents. Grâce à ce jumeau numérique simulable, ils ont la capacité de tester virtuellement de nombreux scénarios d'aménagement, qu'il s'agisse de construire de nouveaux équipements, de rénover des bâtiments ou encore d'installer un réseau de chaleur urbain. L'une des simulations testées a par exemple permis de déterminer qu'une commune pourrait réduire de 75 % les émissions de CO₂ d'un quartier sur 20 ans en privilégiant la géothermie par rapport aux énergies fossiles tout en préservant un tarif de l'énergie attractif.

« En France, les responsables du secteur public ont fait appel à nos partenaires Cosmo Tech et SystemX pour modéliser et simuler la croissance d'un territoire. Ils se sont appuyés sur « Azur Digital Twin » ainsi que sur nos données et services d'analyse pour déterminer l'emplacement des nouvelles sources d'énergie et leur impact sur le réseau électrique. »

expliquait **Satya Nadella**, Chairman et CEO de Microsoft, à l'occasion de sa keynote donnée en juillet 2021 lors de l'évènement « Microsoft Inspire »

« Grâce à notre plateforme, un cas d'usage portant sur la commune de Longjumeau a été démontré. La consolidation des données a permis de visualiser un croisement entre une zone à fort potentiel en énergie géothermique et une nouvelle zone d'aménagement concertée (ZAC) dans la ville. Nous avons notamment simulé l'installation d'un réseau de chaleur sur la zone pour quantifier l'impact d'un tel projet. »

Amira Ben Hamida,
Cheffe de projet et Responsable de la thématique
Économie circulaire et transition écologique,
IRT SystemX



INTERVIEW



Grégoire de Lasteyrie

Président,
Communauté
d'agglomération
Paris-Saclay

Pourquoi l'agglomération Paris-Saclay s'est-elle portée partie prenante du projet Decarbonized City ?

L'agglomération Paris-Saclay a une culture particulière de l'innovation et de la création symbolisée par un « pôle d'innovation technologique » qui concentre près de 20% de la recherche française ! De manière logique, le territoire est en pointe dans le domaine de la transition écologique et environnementale, avec une feuille de route très claire définie par notre Plan Climat Air Énergie Territorial. Pour le tenir, nous avons décidé de faire remonter la question énergétique le plus en amont possible des projets. C'est la raison pour laquelle nous avons tout de suite perçu l'intérêt du projet de démonstrateur Decarbonized City, mené en collaboration avec l'IRT SystemX et Cosmo Tech. Il nous offre un outil opérationnel aux multiples débouchés potentiels, qui favorise une dynamique vertueuse de coopération et de partenariat entre des acteurs très différents : ce qui est indispensable pour réussir la transition écologique de manière plus générale !

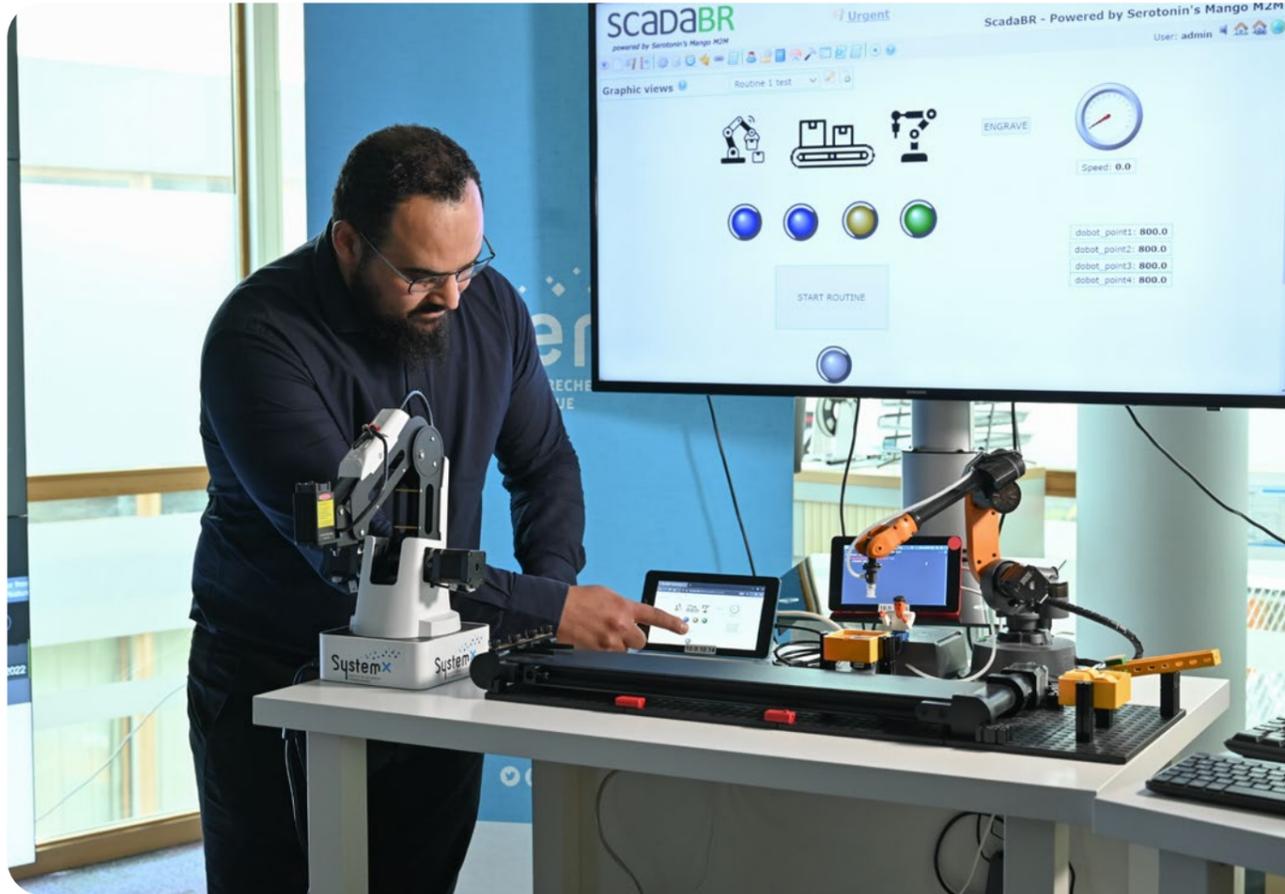
Comment le démonstrateur Decarbonized City va-t-il accompagner la transition écologique du territoire Paris-Saclay ?

Decarbonized City offre aux élus du territoire un outil de scénarisation de choix énergétiques à l'échelle d'un quartier, qui permet de tester différents scénarios. Il est désormais possible de visualiser l'ensemble des réseaux d'énergie sur le territoire, en relation avec les consommations réelles, mais aussi de connaître le potentiel en énergies renouvelables, de faire des états des lieux précis par zones géographiques et de travailler sur des études d'impact et notamment des scénarios de choix de source d'énergie. Cet outil est inédit car il nous permet de mesurer l'impact énergétique des futurs projets d'aménagement, de travailler sur des scénarios énergétiques alternatifs et surtout de mieux impliquer l'ensemble des parties prenantes aux enjeux opérationnels et techniques de la transition écologique. À court et moyen terme, le démonstrateur va notamment nous permettre de finaliser notre schéma directeur des énergies renouvelables et d'ouvrir de nouveaux champs d'étude sur des sujets aussi différents que le pilotage énergétique des bâtiments, l'implantation de data centers, le déploiement de réseaux de chaleur, ou encore la mise en place de zones de compensation environnementale et carbone.



Assurer la cybersécurité des systèmes de production industriels

L'IRT SystemX développe, en collaboration avec Naval Group, Atos, Airbus, SPIE et BeijaFlore, une plateforme cyber-physique dédiée à la recherche en cybersécurité. Baptisée CHES4Industries (Cybersecurity Hardening Environment for Systems of Systems for Industries), la plateforme permet la modélisation, la simulation et l'émulation d'infrastructures ou systèmes industriels complexes (énergie, traitement de l'eau, grutage, chaînes de fabrication, etc.) pour évaluer leur niveau de sécurité et tester des solutions ou stratégies de défense adaptées.



La plateforme est composée de plusieurs briques technologiques innovantes :

- des équipements cyber-physiques représentant les composants matériels du système industriel,
- des jumeaux numériques permettant la simulation de procédés industriels complexes,
- et un catalogue d'attaques pour l'évaluation de solutions de sécurité.

La plateforme CHES4Industries est actuellement exploitée dans le cadre de deux projets d'envergure. Tout d'abord, le projet européen H2020 SeCoIIA, portant sur la sécurisation des chaînes de production aéronautiques, navales et automobiles. Ensuite, elle est déployée au sein du projet de R&D Ports du Futurs Sécurisés (PFS) de l'IRT SystemX visant à sécuriser les infrastructures maritimes critiques. Une offre de services est actuellement à l'étude pour ouvrir la plateforme à d'autres acteurs, notamment dans le cadre de formations ou de sensibilisations à la sécurité numérique.

Reda Yaich,
Responsable de l'équipe Sécurité numérique
et réseaux, IRT SystemX

FOCUS

L'IRT SystemX, partie prenante du projet H2020 SeCoIIA, Secure Collaborative Intelligent Industrial Assets

Dans le cadre du projet SeCoIIA, l'IRT SystemX a développé et validé un prototype pour une gestion décentralisée et résiliente du contrôle d'accès aux ressources cryptographiques utilisées au sein d'une chaîne logistique de fabrication de composants électroniques.

Le démonstrateur est le fruit de l'intégration de trois technologies :

- un protocole innovant de chiffrement par attributs permettant la révocation de droit dans un environnement distribué,
- un modèle de contrôle d'accès basé sur les attributs,
- la blockchain, pour assurer la traçabilité des opérations et la résilience de la plateforme.

Le démonstrateur a été validé dans le cadre d'un cas d'usage automobile porté par le groupe Continental. La preuve de concept a démontré l'intérêt du chiffrement par attributs pour assurer la confidentialité de bout-en-bout des éléments cryptographiques utilisés dans la fabrication des boîtiers communicants (ECUs). Le chiffrement par attributs rend possible l'accès à un sous-ensemble des éléments cryptographiques (métadonnées) nécessaires à leur traitement tout en garantissant la confidentialité du reste du contenu (clés, numéros aléatoires, etc.). Leur divulgation compromettrait l'intégrité numérique des véhicules et mettrait en danger leurs passagers. Une réflexion est en cours avec Airbus pour étudier l'applicabilité de l'approche à un cas d'usage aéronautique. L'objectif est d'appliquer la même technologie à la mise en partage de données issues de plusieurs usines afin d'optimiser le processus de fabrication sans compromettre la confidentialité des données partagées.



INTERVIEW



Adrien Becue
Head of Innovation,
Airbus Cybersecurity

À quels objectifs répond le projet SeCoIIA ?

Le projet SeCoIIA (Secure Collaborative Intelligent Industrial Assets) a pour but de concevoir la sécurité des systèmes collaboratifs de production industrielle du futur. Ses objectifs principaux sont :

- le développement et la validation de systèmes de simulation, de test et d'entraînement immersif, basés sur des jumeaux numériques de l'outil industriel,
- la mise au point et la validation de technologies d'authentification et de chiffrement applicables aux clouds industriels distribués (Cloud Manufacturing),
- la construction et la validation de systèmes collaboratifs de détection, de décision et de réponse aux incidents de sécurité industrielle,
- la définition de méthodes de développement d'une IA robuste, de principes de responsabilité juridique et de techniques de recueil de preuves numériques, applicables à l'usine du futur,
- la démonstration de ces capacités clés appliquées à la sécurité de plusieurs secteurs industriels : aérospatial, automobile, naval et robotique.

Qu'a apporté l'IRT SystemX à ce projet d'envergure européenne ?

Les contributions de l'IRT SystemX ont été multiples et au centre des avancées technologiques du projet. Tout d'abord, l'institut a développé des jumeaux numériques intégrés dans l'outil Airbus CyberRange, dédiés

au test, à l'entraînement et à la démonstration de cas d'usage des domaines automobiles et navals. Dans un deuxième temps, les équipes ont élaboré des techniques de chiffrement par attributs applicables aux environnements clouds distribués. Enfin, SystemX a réalisé l'intégration, le test et la démonstration de scénarios de menaces appliqués aux systèmes pilotes automobiles et navals.

Comment évaluez-vous le potentiel d'innovation de la solution de chiffrement par attributs ? Quel serait son impact sur la manufacture collaborative ?

La solution de chiffrement par attributs développée par l'IRT SystemX répond au besoin d'échange d'informations sensibles entre partenaires industriels au sein d'une supply chain étendue. Cette solution présente des avantages considérables :

- le chiffrement et le contrôle d'accès au point de données, la gestion fine des autorisations en contexte de collaboration industrielle entre acteurs ayant différents niveaux de privilèges,
- l'applicabilité aux environnements clouds distribués, l'absence de point de défaillance unique, la résilience aux attaques en déni de service et aux scénarios de faute byzantine,
- le passage à l'échelle et le renforcement du mécanisme de sécurité par croissance de la communauté d'utilisateurs, la traçabilité et le caractère auditable des transactions et la compatibilité avec les mesures de protection de la vie privée.



Expérimenter les interfaces homme-machine pour accompagner les conducteurs de véhicules automatisés

Afin de soutenir l'automatisation des véhicules, l'IRT SystemX a réalisé, intégré et mis au point, en collaboration avec ses partenaires Arkamys, Renault Group, Saint-Gobain Sekurit et Valeo, un poste de conduite innovant intégré dans un véhicule de série non roulant équipé de plusieurs modalités d'interactions et d'une simulation de conduite. Cette plateforme d'expérimentation a permis d'évaluer la pertinence de plusieurs modalités et ergonomies d'interaction du système autonome avec le conducteur, dans un environnement de conduite simulée, en le confrontant à des scénarios singuliers.



Le cockpit se compose de différentes briques technologiques : une architecture embarquée générique intégrant un automate de gestion de quatre niveaux de conduite automatisée, un ensemble de règles avec reconnaissance de contexte et différentes assistances (sons, vibrations, éclairages LED intégrés dans le pare-brise et dans le volant, assistant holographique). Ces briques ont permis de proposer des Interfaces Homme-Machine (IHM) multimodales et synchrones, tout en variant les modalités sollicitées, pour adapter les interactions entre le véhicule et les conducteurs en fonction du contexte de conduite et ainsi faciliter son usage.

Plus de 150 personnes, représentatives d'un échantillon hétérogène de conducteurs, ont expérimenté les différents scénarios mis au point par les équipes de l'institut afin de valider les configurations IHM lors de différents cas d'usage (reprise du contrôle du véhicule, conditions de conduites dégradées, etc.).

INTERVIEW



Bruno Albesa
Directeur R&D
et Innovation,
Valeo

Quels étaient les enjeux de votre implication au sein du projet de R&D CMI (Cockpit Multimodal Interactif) ?

Valeo a intégré le projet CMI au moment de son démarrage en 2018. Notre objectif était d'évaluer la performance des interfaces homme-machine au sein des véhicules autonomes en collaborant avec plusieurs partenaires académiques et industriels de renom. Plus précisément, nous avons œuvré à l'accompagnement des conducteurs dans la compréhension de l'état de leur véhicule (par exemple dans l'activation du mode manuel ou autonome) et des informations transmises (embouteillages à venir sur la route, dégradation des conditions météorologiques, etc.). Nous avons établi des *personae* présentant des comportements très différents face aux technologies du véhicule autonome : certains étant très à l'aise

dans leur adoption de celles-ci, et d'autres moins enclins à l'usage d'innovations nouvelles. Nous avons étudié la mise en place de solutions adaptées à chacun de ces profils à travers de différentes modalités sensorielles.

Comment allez-vous exploiter les résultats obtenus lors des différentes expérimentations menées ?

En fonction de l'évolution des technologies et de leur adoption, Valeo adapte les feuilles de route technologiques de ses produits à destination des constructeurs automobiles et des nouveaux acteurs de la mobilité. Les différentes expérimentations que nous avons réalisées aux côtés de l'IRT SystemX nous permettront de les affiner ou de les conforter pour répondre aux différents besoins d'accompagnement des conducteurs de véhicules autonomes.

« Les résultats obtenus ont permis d'alimenter les feuilles de route des partenaires de l'institut. Renault Group les revalorise actuellement sur les retours haptiques (vibrations ou efforts transmis par le volant au conducteur) en vue d'une industrialisation pour ses futurs véhicules. Valeo a déposé, en partenariat avec Renault Group, un brevet sur l'utilisation des LEDs sur le volant. Enfin, Saint-Gobain Sekurit a prévu de réutiliser la méthode et l'outil de définition de roadmap pour l'innovation produit en se basant sur un processus de prévision des tendances user-experience. »

Kahina Amokrane,
Ingénieure-chercheuse
Architecte Interaction,
usages et connaissances,
IRT SystemX

FOCUS

Une réutilisation des résultats dans le programme Confiace.ai

Le programme Confiace.ai a poursuivi les travaux menés dans le cadre du projet CMI, en s'appuyant sur la méthode d'évaluation de la confiance de l'utilisateur pour l'interaction avec un système. L'enjeu sera désormais d'élargir cette méthode aux systèmes composés de briques d'intelligence artificielle et d'améliorer la prise en compte des différentes dimensions d'évaluation de cette confiance.





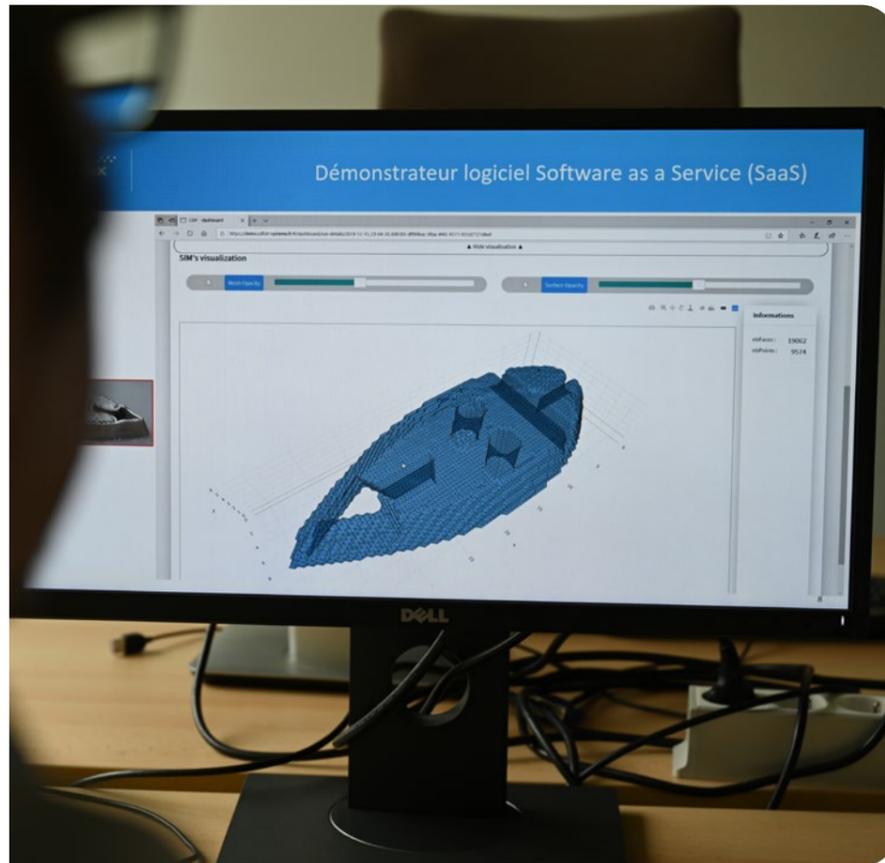
Simuler le processus de fabrication additive pour optimiser ses performances

L'IRT SystemX a développé une chaîne numérique d'outils et de méthodes innovantes, capable de simuler un procédé de fabrication additive de type LMD (Laser Metal Deposition). Cette simulation a pour objectif d'évaluer différentes stratégies de réalisation en fonction de la géométrie de la pièce, afin d'optimiser le procédé en production en matière de qualité et de délais.

Mise au point en collaboration avec DP Research Institute (DPRI), l'ENS Paris-Saclay, l'ENISE (École d'ingénieurs en Génie Mécanique, Civil, Physique – École Centrale de Lyon), Safran et SPRING Technologies, cette solution logicielle assure une simulation topologique de la pièce intégrant les données cinématiques simulées (c'est-à-dire la vitesse et la position de la buse en fonction du temps). Elle repose sur quatre briques logicielles :

- une brique de simulation de dépôt de matière,
- une brique de simulation cinématique du comportement machine,
- une brique de gestion des collisions,
- et une brique d'optimisation des trajectoires.

Le démonstrateur a été exploité par Safran afin de traiter un cas d'usage de fabrication d'une pièce. Les résultats obtenus ont permis de valider les critères d'évaluation des différentes stratégies de fabrication.



INTERVIEW



Christophe Tournier

Professeur des Universités, ENS Paris-Saclay

Comment s'est déroulée votre collaboration avec l'IRT SystemX ?

Mis à disposition à l'IRT SystemX pendant trois ans, j'ai eu l'opportunité de monter trois projets de R&D dans le domaine de la fabrication additive. Le modèle de l'institut nous permet d'avancer dans la réalisation de prototypes numériques. L'équipe transverse Software & DevOps nous accompagne pour développer nos démonstrateurs et partager nos résultats, ce qu'on ne pourrait pas faire dans un laboratoire de recherche.

Que vous a apporté cette expérience ?

Mon passage à SystemX m'a beaucoup apporté dans le domaine du montage de projets et m'a

permis de découvrir d'autres enjeux scientifiques et technologiques, tels que l'internet de confiance, qui s'applique aussi en fabrication additive. J'ai pu y partager mes compétences en fabrication additive et en définition numérique de processus de fabrication. Ajoutées à l'expertise des partenaires industriels et académiques, elles ont bénéficié à l'IRT qui excelle pour accompagner la transformation numérique de l'industrie. Nous avons fait avancer les recherches dans le domaine de manière significative comme en attestent le démonstrateur CDF (Conception des Directives de Fabrication) et les projets DSL (Durabilité des Structures Lattices) et WAS (Wire Additive manufacturing process Simulation).

« Ce démonstrateur apporte des avancées significatives dans le domaine de la fabrication additive. Il rend possible la simulation de la géométrie résultant du dépôt de matière, la prédiction réaliste de la vitesse d'avance de la buse (et donc du temps de fabrication) et la gestion des collisions pour optimiser les trajectoires. L'objectif est de définir et de valider une stratégie de fabrication en production. »

Xavier Lorang,

Chef de projet et Responsable de la thématique Fabrication additive, IRT SystemX



FOCUS

Dans le domaine de l'ingénierie pour l'industrie du futur, l'IRT SystemX s'est également intéressé, en collaboration avec Safran, à l'étude de l'impact des variabilités liées au procédé de fabrication sur l'état de la matière, la résistance mécanique et la durée de vie des structures fabriquées.

INTERVIEW



Oana Ciobanu

Ingénieur méthodes numériques avancées pour la Fabrication additive, Safran

Quelle place occupe le domaine de la fabrication additive au sein du groupe Safran ?

La fabrication additive chez Safran est dédiée au développement et à la livraison de produits compétitifs et innovants. L'objectif est de favoriser la création de valeur au service des clients des sociétés du groupe.

Que reprenez-vous de votre collaboration avec l'IRT SystemX ?

L'IRT SystemX a accompagné Safran dans un premier projet collaboratif, impliquant également l'IRT Saint Exupéry et d'autres acteurs industriels et académiques, autour de la fabrication additive. Dès les premiers échanges, une collaboration fluide a été

construite. L'institut a porté un grand intérêt au sujet et a démontré une compréhension avancée du besoin industriel associé. SystemX a pris en charge le pilotage du projet. Ce dernier a permis le développement de méthodologies et d'outils numériques destinés à la conception des pièces issues de fabrication additive par fusion sur lit de poudre et à l'étude de leur comportement. Les connaissances de l'état de l'art de l'IRT SystemX ont été mises à profit dans l'étude de l'impact des dispersions de fabrication sur la tenue en service des pièces. Un objectif de transfert des connaissances s'est remarqué dans tout développement numérique, regroupé dans une plateforme performante, rapide et simple d'utilisation, disponible dans l'infrastructure Safran.



Accompagner l'ingénierie collaborative des grands systèmes complexes

L'institut a proposé, en collaboration avec ArianeGroup, Dassault Aviation, la DGA (Direction générale de l'armement), Naval Group et Thales, un processus outillé de revue collaborative de modèles hétérogènes en contexte d'entreprise étendue ainsi qu'un processus d'évaluation des alternatives d'architecture visant à produire un classement des différentes solutions d'architectures possibles.



L'ingénierie des grands systèmes complexes implique une multitude de partenaires avec des besoins, des points de vue, des processus et des outils multiples et hétérogènes. Dans ce contexte, il est primordial de maîtriser la chaîne de conception et la cohérence d'ensemble de la spécification afin de garantir le besoin du client final et les coûts. Ce défi de conception nécessite de mettre en œuvre des processus innovants d'ingénierie collaborative, faisant intervenir la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre industrielle et d'autres partenaires industriels. L'IRT SystemX s'est intéressé, dans un contexte d'ingénierie système dirigée par les modèles (MBSE), au partage et à la maîtrise de la complexité de ces grands systèmes, par la gestion de la cohérence entre les données d'ingénierie système et par la recherche et la comparaison de solutions d'architecture offrant le meilleur compromis.

Le processus de revue a été implémenté dans le cadre d'un programme de défense « avions de chasse et équipements » sur la plateforme 3DExperience de Dassault Systèmes et a fait ressortir les éléments clés d'une revue de modèles :

- un chemin de lecture afin de guider le relecteur dans la revue des modèles en proposant un ordre d'affichage,
- une annotation graphique et textuelle de modèles,
- un fil de discussions,
- une gestion de la confidentialité du partage de la donnée en fonction des parties prenantes.

Le processus d'évaluation d'architecture a été testé à partir d'un cas d'étude d'ingénierie de système de systèmes complexes. Combiné au processus précédent de revue collaborative, le test a consisté à partager et à valider, par la revue, les alternatives d'architecture à évaluer, puis à mesurer ces alternatives selon le processus d'évaluation d'architecture, en s'appuyant sur la plateforme 3DExperience et sur la mise en œuvre sur une plateforme de collaboration innovante (DCIDE – *Dashboard for Innovative Collaborative Decision*).

Ces processus pourront être exploités par les différents acteurs industriels collaborant autour de grands programmes, en particulier dans les domaines de la défense, de l'aéronautique et du naval.

Il reste encore de nombreux sujets à explorer : la maîtrise de la cohérence, la continuité numérique, la coévolution ou la cosimulation de modèles. Nous espérons poursuivre nos travaux avec nos partenaires et construire les processus de collaboration de demain.

Anouk Dubois,
Cheffe de projet et Responsable de la thématique Entreprise étendue, IRT SystemX

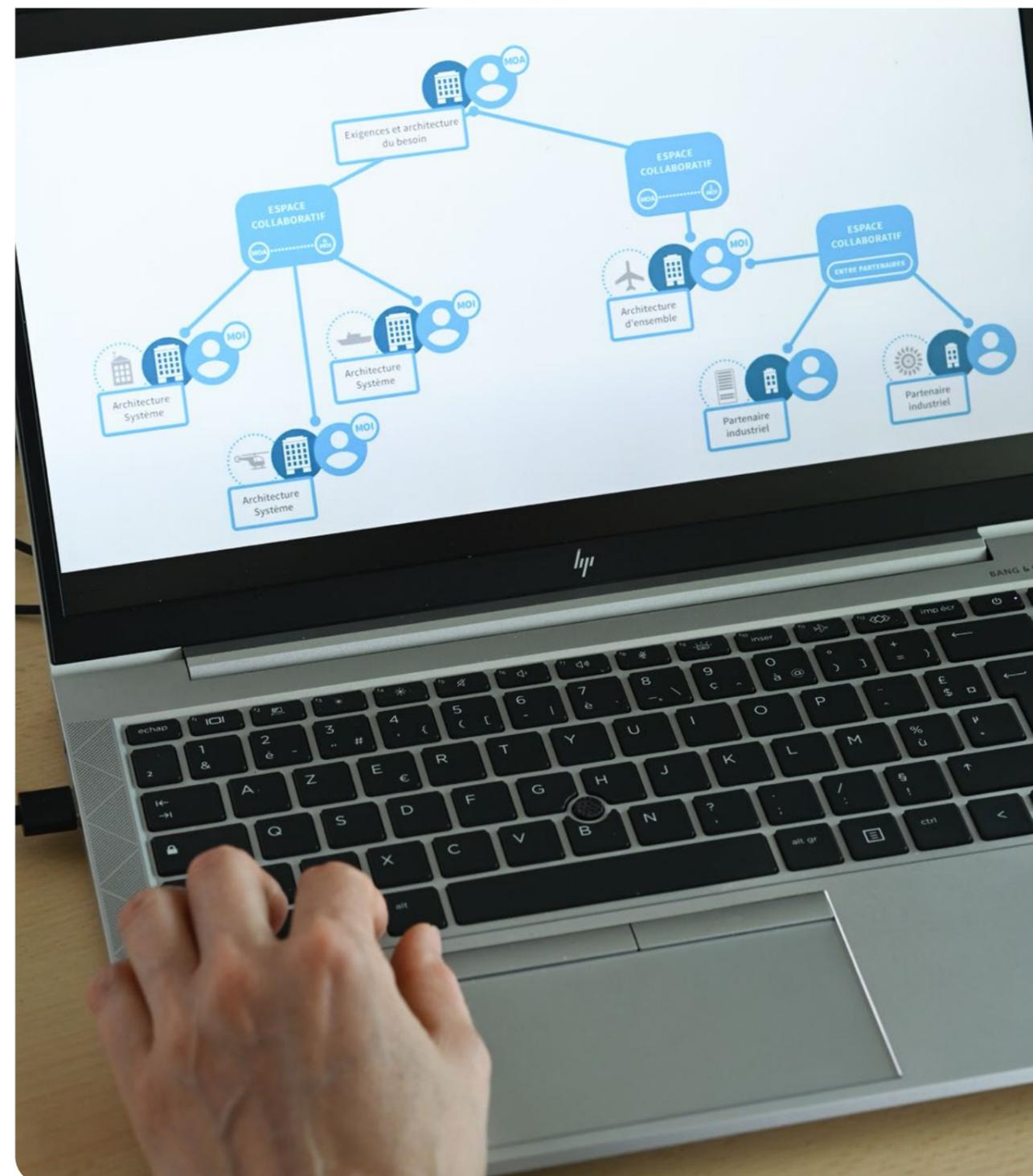
L'IRT SystemX a accompagné les acteurs de la défense dans l'expérimentation de nouvelles méthodes, au service de grands programmes de R&D. En facilitant les revues techniques, la gestion de cohérence et l'exploration d'architectures de systèmes, nous avons amélioré l'efficacité opérationnelle des systèmes sous contrainte budgétaire. Travailler avec l'IRT SystemX a représenté une réelle opportunité pour la DGA afin de faciliter la collaboration avec ses partenaires, tout en bénéficiant d'un terrain neutre.

Jean-Philippe Masson*,
Sous-directeur ingénierie, chef du projet Ingénierie système, DGA

* Témoignage recueilli en 2019.

Nous avons choisi d'intégrer un projet de R&D mené par l'IRT SystemX afin de collaborer avec d'autres acteurs industriels dans un mode non compétitif, autour de la mise au point de processus innovants. Nous nous sommes appuyés sur la plateforme 3DExperience de Dassault Systèmes pour implémenter les outils développés par les différents industriels et réaliser des maquettages. Nous nous sommes notamment intéressés au processus de revue, fondamental car il permet de comparer la maquette numérique du besoin de l'utilisateur avec la maquette numérique de la solution proposée par les industriels.

Jean Sass,
Directeur Général en charge de la transformation numérique, Dassault Aviation





Cibler les usages pour concrétiser la conduite du changement

L'IRT SystemX a développé, en partenariat avec Mappy et la Métropole de Lyon, un wallet dédié aux usagers basé sur la technologie blockchain pour centraliser l'ensemble des informations relatives à leurs pratiques de mobilité. L'objectif est d'accélérer l'adoption de nouvelles politiques en déployant des incitations ciblées sur les pratiques.

Comment inciter et superviser l'usage de pratiques de mobilité vertueuses au sein d'un territoire et valoriser les comportements positifs des usagers qui les adoptent ? Pour répondre à cette problématique, l'institut et ses partenaires ont prototypé une application mobile (le « wallet mobilité ») dédiée aux usagers. Elle permet de synchroniser plusieurs fournisseurs de services, de consolider les titres de transports, et de gérer des tokens locaux (i.e. des actifs numériques dans une blockchain) qui peuvent être utilisés pour payer des services au sein d'une

place de marché de la mobilité, l'ensemble étant piloté et supervisé par le territoire qui définit sa stratégie d'incitation.

La conduite du changement représente un enjeu considérable pour faire évoluer les pratiques, en complément des dispositifs réglementaires. Ces modalités s'appuient sur la certification des usages et le ciblage des mesures en fonction des pratiques. Un portail permet aux collectivités de paramétrer des campagnes d'incitation ou de tarification dynamique.

À titre d'exemple, cette solution de wallet permet de récompenser certaines pratiques (covoiturages fréquents, étalement des pics de charge, etc.) par des tokens réutilisables pour des services de mobilité selon des modalités préétablies. La flexibilité de l'outil et les possibilités de configuration confèrent aux sponsors une capacité d'intervention circonstanciée.

Cette solution constitue un vecteur de mise en œuvre opérationnelle de la conduite du changement en associant des modalités d'incitations financières et des preuves d'usage. Nous étudions les perspectives d'extension des cas d'études au-delà du champ de la mobilité.

Yann Briand,
Chef de projet et Responsable
de la thématique Mobilités du futur,
IRT SystemX

FOCUS

Digitaliser le nudge pour décarboner

L'usage de ces mécanismes de certification-incitation est à l'étude pour répondre à d'autres défis sociétaux. Les équipes de l'IRT SystemX ont exploré des principes dérogatoires, tels que la tarification sociale, applicables par exemple dans les zones à faibles émissions (ZFE). Cette approche permettrait d'intégrer des principes d'équité basés sur des attributs personnels (bénéficiaire du revenu de solidarité active (RSA) par exemple) et d'implémenter des systèmes d'exemption dynamiques.

Les enjeux de décarbonation sont multisectoriels et agrègent les acteurs institutionnels et économiques autour d'objectifs communs. L'institut étudie des dispositifs permettant de fédérer des communautés d'usagers et d'opérateurs autour de programmes d'incitatifs communs.

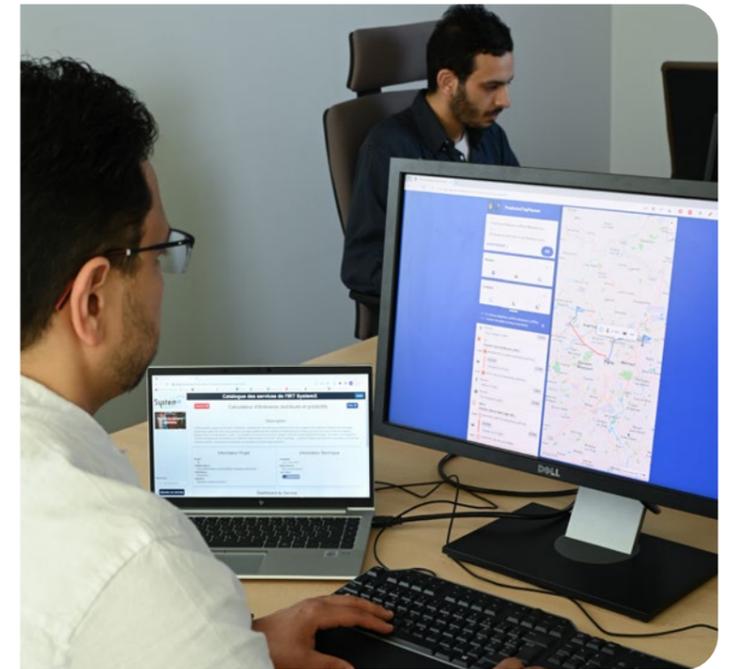


Personnaliser l'expérience de mobilité des voyageurs

L'IRT SystemX a mis au point, aux côtés de Hove et Île-de-France Mobilités, une architecture distribuée de calculateur d'itinéraires multimodal innovant, prenant en compte la prévision d'affluence afin d'enrichir l'information voyageurs et d'étendre l'interopérabilité des systèmes actuels.

Les travaux de R&D menés par l'institut ont contribué à élargir la capacité multimodale du planificateur d'itinéraires Navitia¹, jusqu'alors centré sur les voyages en transports en commun. Il intègre dorénavant d'autres modes de déplacements : les transports routiers et la mobilité douce.

Les équipes de l'IRT SystemX ont également repensé l'architecture de Navitia en la dotant de nouvelles fonctionnalités basées sur des modèles avancés d'intelligence artificielle. Ces intégrations ont permis de fournir de l'information voyageurs prédictive basée sur des indicateurs qualitatifs liés au confort de trajets. Les données relatives à l'affluence en station et à l'occupation des trains ont ainsi été intégrées à l'outil afin d'augmenter l'information proposée et d'enrichir l'expérience de mobilité des voyageurs.



INTERVIEW



Malik Chebragui
Directeur des opérations,
Hove

Que vous a apporté votre collaboration avec l'IRT SystemX ?

Pour Hove, l'enjeu est de rester dans la course du MaaS (Mobility as a Service). Les travaux menés avec l'IRT SystemX nous ont permis d'ouvrir l'architecture de notre calculateur Navitia à d'autres modes et services de mobilités mais également d'être innovants sur l'intégration de nouvelles données disponibles sur le trafic et les flux voyageurs. Nous avons pu rester « pionniers » sur le développement de plateformes d'information voyageurs en capacité de faire converger toutes les mobilités. Les résultats ont été industrialisés dès 2020. Ces derniers nous permettent de fournir aujourd'hui à nos clients des solutions de mobilités novatrices.

Quelles sont les perspectives d'utilisation de votre calculateur Navitia dans les prochaines années ?

Hove s'est positionné comme le leader français de l'information voyageurs multimodale, et nous souhaitons accélérer notre développement en France et à l'international. Tout d'abord, en enrichissant l'information aux voyageurs et en l'adaptant à leurs nouvelles attentes (alertes de perturbation, confort, etc.). Ensuite, en apportant plus de dynamisme en temps réel dans la construction de cette information pour répondre aux besoins de flexibilité des autorités organisatrices de la mobilité (AOM). Enfin, nous œuvrons à effacer les barrières géographiques pour proposer, autour de Navitia, des solutions de mobilités locales, régionales et nationales, voire internationales, avec une utilisation transfrontalière. Notre portée actuelle est considérable et nous souhaitons lever l'ensemble des limites à la mobilité grâce à la richesse de l'information voyageurs et à l'intermodalité.

Cette nouvelle architecture a été testée et évaluée sur le périmètre de la ligne Transilien H avec des données réelles fournies par nos partenaires. La solution développée a été industrialisée par Hove (ex Kisio Digital) en 2020 alors que le volet de planification multi-critères est attendu en 2022. Les travaux bénéficieront également au planificateur d'itinéraires ViaNavigo, reposant sur Navitia et proposé par Île-de-France Mobilités.

Mostepha Khoudjia,
Chef de projet,
IRT SystemX

1. API ouverte de référence dédiée à la mobilité, développée par Hove



Optimiser l'exploitation des voies réservées au covoiturage

L'IRT SystemX a développé, en collaboration avec SPIE CityNetworks, un Outil d'Aide à la Décision pour l'exploitation des Voies dynamiques Réservées au covoiturage (OAD VR). La solution a fait l'objet d'expérimentations en partenariat avec la Métropole de Lyon et est prête à être industrialisée.

OAD VR est une console dédiée aux opérateurs routiers. Cet outil permet d'anticiper les conditions de trafic sur un réseau et délivre des consignes visant à maximiser la disponibilité des voies dynamiques, sans dégrader les conditions de circulation sur les axes connexes. Les développements combinent l'élaboration d'algorithmes de prévision de trafic selon plusieurs horizons temporels, un moteur de décision et une interface homme-machine intuitive délivrant en temps réel des instructions opérationnelles. Des travaux de modélisation ont permis d'identifier les régimes de fonctionnement

de ces infrastructures innovantes. En cherchant à augmenter les capacités d'analyse du trafic routier, l'institut a testé une solution de comptage des passagers à bord des véhicules, sur toutes les voies d'un réseau. En partenariat avec la Métropole de Lyon et Vinci Autoroutes, un système intégrant des caméras vidéo, un protocole de traitement d'image et un portail d'exploration ont été testés. Le débit d'usagers ainsi généré représente une donnée inédite. Le passage à l'échelle de ce type de solution ouvre des pistes prometteuses pour l'exploitation dynamique et prédictive des réseaux.



© Thierry Fournier



INTERVIEW

Guillaume Georgin

Chef de service - Systèmes d'information pour la Mobilité, SPIE CityNetworks

En quoi la solution OAD VR apporte-elle une réponse inédite aux problématiques d'exploitation et de régulation des voies dynamiques réservées au covoiturage ?

OAD VR a fait émerger deux innovations majeures dans ce domaine. La première concerne la gestion dynamique des voies de covoiturage qui est actuellement en plein développement en France. Cette gestion est aujourd'hui très « statique ». Elle s'appuie essentiellement sur la typologie des trajets sur ces voies et notamment sur les trajets domicile-travail. OAD VR offre la possibilité d'affecter dynamiquement ces voies à une utilisation de covoiturage en fonction non seulement du trafic mais aussi des événements qui peuvent se produire sur le réseau. La seconde innovation porte sur les notions d'anticipation et de prévision mises en œuvre dans cette gestion dynamique. En s'appuyant sur des outils d'aide à la décision basés sur des technologies de deep learning liées aux données historiques et en temps réel de trafic, l'optimisation de ces voies a été facilitée.

Quel bilan tirez-vous des expérimentations menées à Lyon ?

Au niveau technique, nous avons pu valider des modèles de prédiction avec un degré de précision des prévisions de trafic de l'ordre de 95 %. Ce résultat conforte les expérimentations menées et facilitera l'industrialisation de solutions pour répondre aux besoins du marché actuel de la mobilité. Sur le plan collaboratif, l'IRT SystemX dispose d'une capacité notable à animer un écosystème d'acteurs, tant publics que privés et à fédérer leurs énergies autour d'un objectif commun. Être partie prenante d'un tel projet nous a permis de confronter et d'évaluer les résultats de ces expérimentations.

Quelles sont les perspectives de cette solution ?

Elles sont nombreuses ! Je vais notamment citer la sélection de notre projet dans le cadre de l'appel à innovations lancé en 2021 par l'association France Mobilités, aux côtés de Cyclope.ai, HERE, Lacroix et SystemX. Il consiste à mettre en œuvre un système dédié à l'optimisation des voies réservées et des carrefours intelligents pour les Jeux Olympiques et Paralympiques de 2024. Au-delà de ces expérimentations, SPIE CityNetworks souhaite industrialiser ces innovations dans le cadre des solutions déployées actuellement pour accompagner les acteurs de la mobilité.

Les expérimentations ont été réalisées sur les boulevards urbains M6 et M7 de la Métropole de Lyon. Nous étudions conjointement, avec les partenaires de l'institut, des opportunités de répliation sur d'autres territoires.

Yann Briand, Chef de projet et Responsable de la thématique Mobilités du futur, IRT SystemX



Développer des réseaux de télécommunications mobiles de plus en plus performants

Pour répondre au défi du déploiement du réseau 5G à grande échelle, l'IRT SystemX a réalisé une preuve de concept en s'appuyant sur la solution radio-logicielle open source OpenAirInterface (OAI). Dans ce cadre, l'institut a considéré l'architecture Cloud-RAN (Cloud Radio Access Network) du réseau d'accès radio qui permet de reporter la complexité de traitement des données dans une plateforme de calcul de type cloud centralisé, afin de vérifier ses performances.



La 5^e génération de réseaux de télécommunications mobiles est conçue pour répondre aux besoins croissants de bande passante et de connectivité dans des zones de plus en plus denses. Les équipementiers et les opérateurs de télécommunications font face à un triple enjeu : assurer la montée à l'échelle de cette connectivité, tout en améliorant les performances de latence et de consommation énergétique des infrastructures sous-jacentes. Les travaux menés par l'institut, en collabo-

ration avec Nokia, Open-Cells et Orange, ont consisté à proposer une décomposition (dite *split*) des fonctions du réseau d'accès radio, certaines étant conservées au plus près de l'antenne et d'autres débarquées au niveau du cloud. Cette décomposition a permis d'obtenir une architecture Cloud-RAN qui respecte les spécifications de la « 5G New Radio », établies par la 3GPP (3rd Generation Partnership - coopération entre organismes de normalisation en télécommunications).

L'IRT SystemX a émulé un réseau 5G, avec quelques antennes et un déploiement réussi du logiciel OpenAirInterface, afin de proposer une architecture de split. Les opérateurs et équipementiers de télécommunications peuvent s'appuyer sur cette solution pour étudier la performance des déploiements à grande échelle de leurs réseaux.

Makhlouf Hadji, Ingénieur-chercheur expert, IRT SystemX



INTERVIEWS

Laurent Thomas

Directeur, Open Cells project

Sur le plan technique, quels sont les grands verrous inhérents au déploiement de la 5G ?

La 5G utilise des fréquences plus élevées que la 4G et une bande complètement nouvelle pour les communications mobiles, la bande millimétrique (24-27GHz). La radio va exploiter davantage la configuration physique entre les émetteurs/récepteurs avec plus d'antennes par objet, grâce aux techniques MIMO (entrée/sortie multiples) et *beamforming* (formation d'un faisceau en combinant les antennes). Ces innovations offriront un débit par abonné bien supérieur, ainsi qu'une latence beaucoup plus faible que la 4G. En plus du déploiement des relais 5G, tout le réseau filaire va devoir s'adapter à ces nouvelles capacités de la partie radio.



Francesca Bassi

Ingénieure-chercheuse confirmée, IRT SystemX

En quoi les travaux menés par l'IRT SystemX dans le domaine de la 5G sont-ils novateurs pour le futur ?

Nos travaux ont porté sur l'architecture Cloud-RAN : un nouveau paradigme où les antennes qui assurent la connectivité aux utilisateurs se servent des ressources de calcul au sein d'un cloud. La réalisation de cette architecture implique le traitement d'un volume massif des données qui remontent vers le cloud. L'IRT SystemX a proposé des stratégies qui rendent possible son déploiement. Le Cloud-RAN rendra possible le développement d'un réseau mobile dense et facilement scalable et la proximité des antennes avec leurs utilisateurs permettra d'optimiser la connectivité et potentiellement d'améliorer la consommation d'énergie.

Améliorer l'agilité des processus de conception des systèmes complexes

L'IRT SystemX a développé, en collaboration avec Renault Group, Sherpa Engineering, Stellantis et Valeo, un prototype d'outils connectés composé de briques logicielles visant à créer une continuité numérique entre les outils de modélisation systèmes et les outils de simulation numérique, dans l'objectif d'améliorer l'agilité dans la conception de systèmes complexes.

Ce prototype novateur a pour fonction de renforcer le lien entre l'architecture système et la simulation numérique afin d'améliorer la prise de décision dans les processus de conception des systèmes complexes. L'outillage réalisé se compose de trois modules principaux :

- SimReq : un outil pour la formalisation de la requête de simulation à partir d'une modélisation SysML,

- SimArT : un outil pour construire une architecture de simulation exécutable,
- un cockpit, offrant une visualisation personnalisée des résultats de simulation pour la prise de décision.

L'efficacité des outils développés a été démontrée sur un cas d'usage industriel portant sur la conception d'un véhicule autonome. Pour construire l'architecture de

simulation dans SimArT, l'institut a engagé une démarche de standardisation du formalisme de description des modèles de simulation MIC (Model Identity Card). Celle-ci a été menée à l'échelle internationale, en collaboration avec le consortium d'industries allemand ProSTEP.



INTERVIEWS

Laurent Di Valentin

CAE senior expert,
Stellantis

Quels sont les objectifs de Stellantis dans le domaine de la conception de systèmes complexes ?

Stellantis souhaite développer des processus outillés agiles allant des spécifications fonctionnelles aux validations des systèmes cyber-physiques, ceci afin de répondre à la complexité croissante des couplages inter-systèmes, tirés par les besoins de l'électrification, du véhicule autonome et de la connectivité, dans un contexte industriel d'optimisation des coûts de développement projet. Ces développements font intervenir plusieurs axes de travail : la modélisation systématique des systèmes grâce aux méthodes SysML, la continuité entre l'outillage SysML et les plateformes de simulation collaboratives, ainsi que la combinaison efficace entre le numérique et le physique.

Que vous a apporté votre collaboration avec l'IRT SystemX ?

Les activités que nous avons menées avec l'institut nous ont permis de travailler sur des méthodes de standardisation au sein de la communauté automobile, pour décrire, par exemple, le contenu et le contexte d'utilisation de modèles de simulation ou encore les scénarios d'événements pour le développement de fonctions ADAS. Ces travaux sont en cours d'implémentation dans nos outils internes de gestion des modèles et dans le cadre de travaux sur le véhicule autonome. Nous nous investirons également dans de futurs projets de R&D de l'IRT SystemX pour étudier plus spécifiquement la maîtrise de la fidélité des modèles de simulation systèmes et la définition de processus opérationnels d'échanges entre constructeurs et équipementiers.



Olivia Penas

Directrice adjointe de la recherche,
ISAE-Supméca

Comment avez-vous contribué au développement de ce prototype d'outils connectés ?

Nous avons proposé des approches scientifiques pour assurer la cohérence des données entre les modèles d'ingénierie système et de simulation. Trois axes de recherche ont été initiés :

- rendre les outils développés indépendants des méthodologies d'ingénierie propres aux entreprises,
- identifier les cohérences sémantiques entre les modèles d'ingénierie systèmes et de simulation, en s'appuyant sur les ontologies,
- générer une métrique de cohérence dans une approche MBSE (ingénierie des systèmes basée sur le modèle) pour faciliter la collaboration entre les architectes systèmes et les experts simulation, en s'appuyant sur les similarités sémantiques et structurelles entre les architectures fonctionnelles, produit et de simulation.

L'expertise des ingénieurs-chercheurs de l'IRT SystemX a permis de prototyper et de valider les approches finalisées sur le cas d'usage du véhicule autonome fourni par les partenaires industriels.

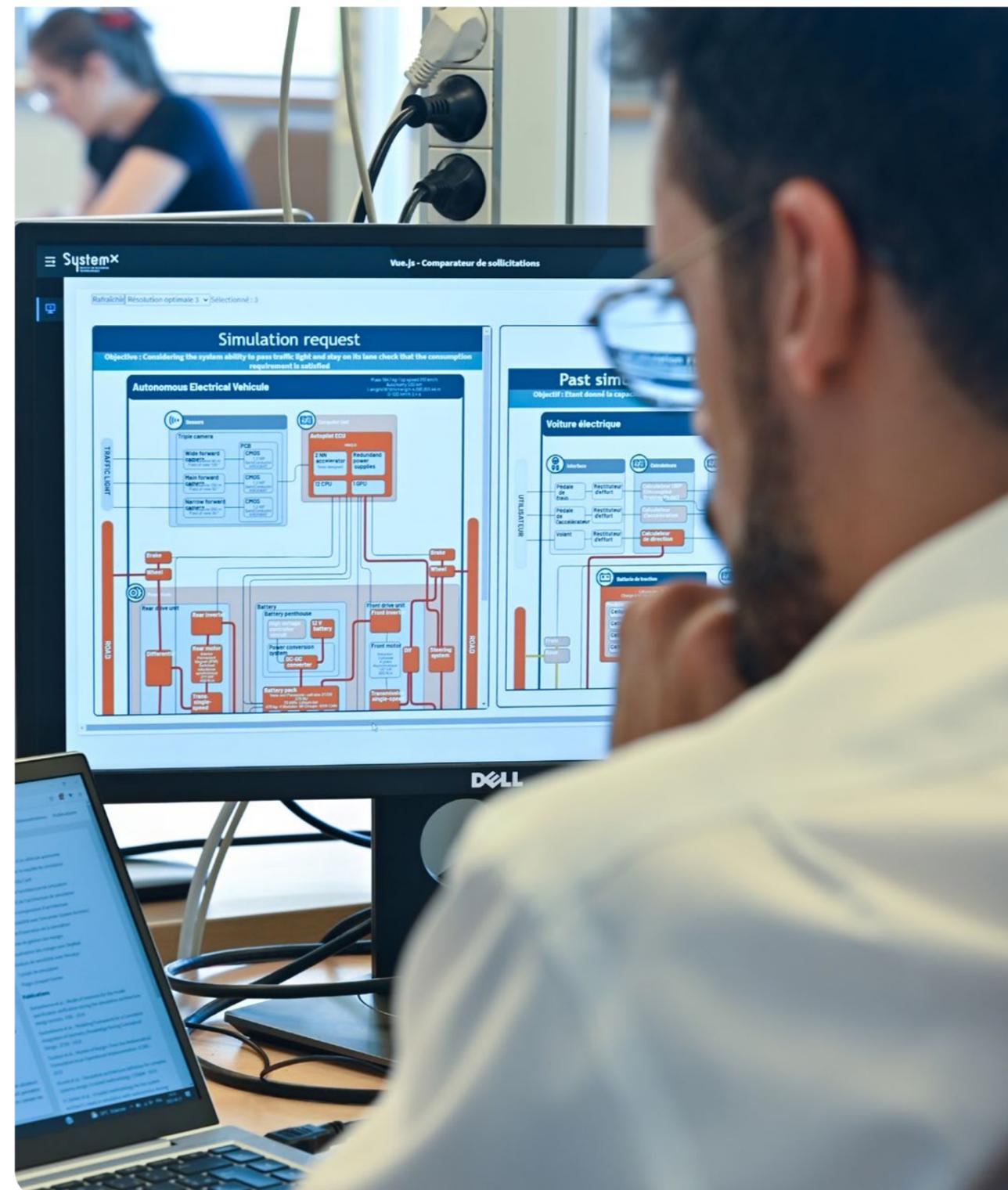
Que reprenez-vous de votre collaboration avec l'institut ?

L'IRT SystemX offre un environnement de travail agréable et propice pour mener des projets de R&D collaboratifs. Notre participation au projet AMC (Agilité des Marges de Conception) a été une expérience très enrichissante d'un point de vue académique car elle nous a permis d'identifier précisément les verrous scientifiques et technologiques associés au projet. Les résultats de ce travail collaboratif ont pu être valorisés auprès des communautés scientifiques internationales au travers de communications dans des conférences et d'articles scientifiques.

Les travaux menés ont permis de développer de nouvelles solutions de façon collaborative, pour renforcer le lien entre l'architecture système et la simulation numérique, et d'améliorer la traçabilité entre systèmes complexes et simulation numérique. Le cas d'usage automobile portant sur la conception du véhicule autonome a permis d'identifier plusieurs verrous liés à la problématique étudiée et de démontrer la faisabilité des outils développés.

Mouadh Yagoubi,

Chef de projet et Responsable de la thématique
Systèmes industriels, IRT SystemX





Concevoir des systèmes à base d'intelligence artificielle de confiance

Le collectif français *Confiance.ai* a produit une première version d'un guide méthodologique à destination des ingénieries industrielles. L'ambition affichée : concevoir des systèmes intégrant des composants à base d'intelligence artificielle (IA) de confiance.

Ce guide méthodologique s'est concentré sur l'intégration de la notion de confiance liée au deep learning. Les travaux menés ont notamment permis de proposer différents outils capables de gérer, d'annoter et de caractériser des données. Ces outils sont complétés par un guide explicitant les méthodes permettant de maîtriser la qualité et le cycle de vie des données gérées (qualité des annotations, gestion des contextes d'usage, etc.).

Dans ce cadre, *Confiance.ai* s'est appuyé sur deux outils clés en main : *DebiAI* et *Pixano*. L'association de ces outils permet d'identifier des données d'intérêt, qui sont ensuite visualisées/corrigées/annotées, et ainsi d'améliorer le flot de données.



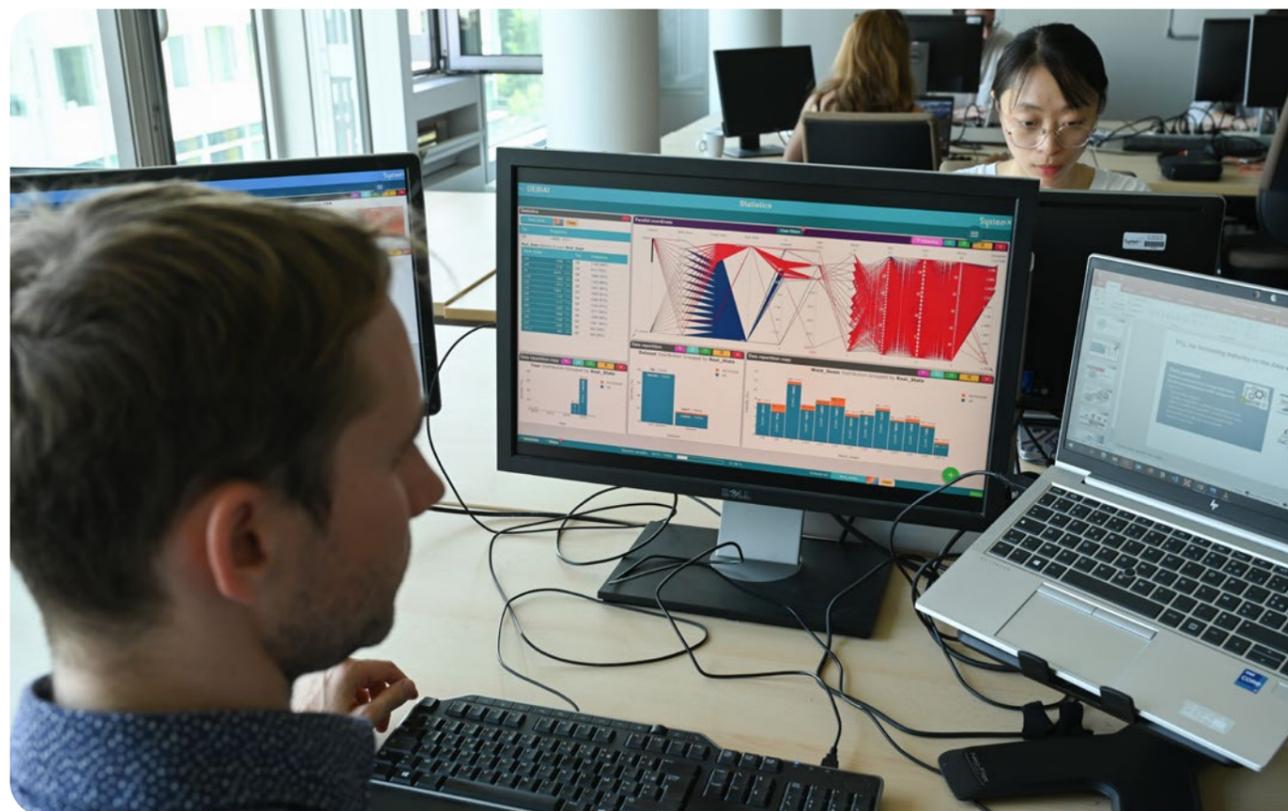
À propos de *DebiAI* :

DebiAI est une application open source mise au point par l'IRT SystemX qui vise à faciliter le processus de développement de modèles d'apprentissage automatique, en particulier dans la phase d'analyse des données du projet et de comparaison des performances du modèle. Ses objectifs sont triples : identifier les biais dans les données, comparer les performances de modèles de machine learning et créer graphiquement des visualisations statistiques des données.



À propos de *Pixano* :

Pixano est un outil open source développé par le CEA List, qui met à disposition de ses utilisateurs un ensemble de composants intelligents et réutilisables pour construire un outil d'annotation d'images et de vidéos, hautement personnalisable. L'objectif est d'explorer et de générer des annotations des données. Cet outil intègre des modèles pré-appris pour pouvoir faciliter et accélérer l'annotation à moindre coût.



Ces deux outils ont été exploités dans le cadre d'un cas d'usage industriel du groupe Renault, portant sur l'inspection visuelle de joints de soudure basée sur un système critique d'intelligence artificielle. Ce système devait répondre à un haut niveau d'efficacité et de fiabilité pour ne manquer aucune anomalie et garantir sa robustesse face à plusieurs conditions visuelles (telles que la luminosité, l'angle de vue ou encore la netteté).

Raphaël Braud,
Ingénieur-chercheur,
Architecte IA,
IRT SystemX



À propos de *Confiance.ai*

Porté par un collectif de 13 partenaires industriels et académiques français majeurs, *Confiance.ai* est le pilier technologique du Grand Défi « Sécuriser, certifier et fiabiliser les systèmes fondés sur l'intelligence artificielle ». Lancé en janvier 2021 pour une durée de quatre ans, ce programme ambitionne de créer une plateforme souveraine, ouverte, interopérable et pérenne d'outils logiciels pour favoriser l'intégration de l'intelligence artificielle de confiance dans les produits et services critiques. Il fédère une quarantaine de partenaires industriels et académiques.

INTERVIEW



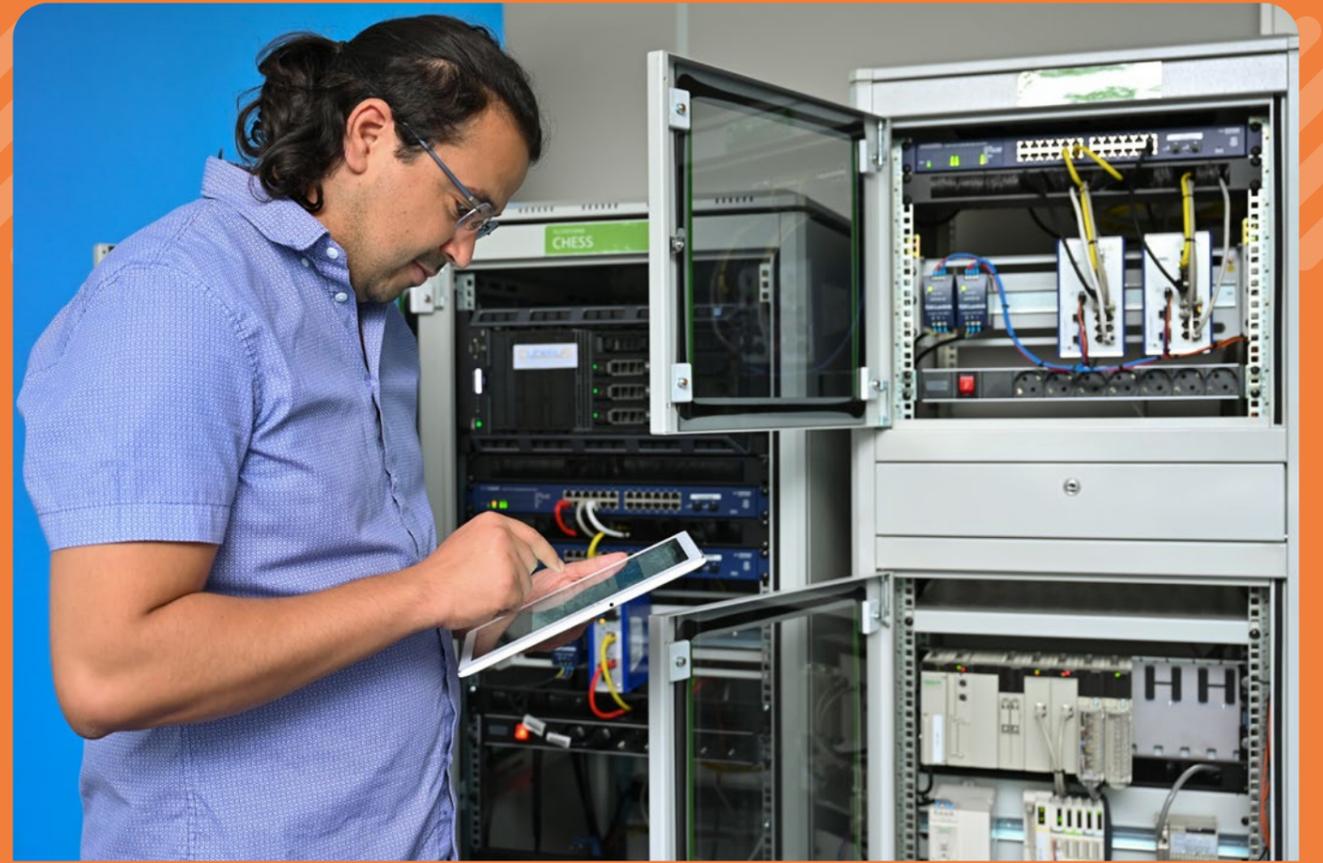
Antoine Leblanc
Expert industrie 4.0,
Renault Group

Que vous apporte votre implication au sein du programme *Confiance.ai* ?

Une intelligence artificielle de confiance doit pouvoir être qualifiée et présenter un fonctionnement optimal dans le temps. De nombreuses solutions d'IA « verticales » sont déjà proposées aux acteurs industriels. Ces solutions reposent sur des services non durables, basés sur des démarches non itératives ou très éloignées de la connaissance réelle du terrain industriel. Le programme *Confiance.ai*, dont le groupe Renault est membre, œuvre à outiller les utilisateurs finaux – les industriels – pour leur permettre de qualifier les données utilisées pour l'apprentissage ou la robustesse de leurs algorithmes. Les cas d'application d'une IA de confiance sur le périmètre industriel sont très nombreux. Une IA adoptée par les opérateurs est envisagée comme un « assistant virtuel » capable de soulager l'homme d'une charge cognitive. Nous pensons qu'une IA de confiance peut permettre de repenser la relation homme-machine, en aménageant les postes de travail et en engageant les acteurs du milieu industriel. Malgré une avance sur le processus de captation de la donnée, le constat actuel est que trop peu de données sont exploitées et très peu de pilotes d'exploitation de la donnée sont transformés en véritable système industriel. Le programme *Confiance.ai* apporte une méthodologie complète de gestion de la donnée et des outils visant à intégrer l'IA dans nos systèmes critiques de production, dans le but d'accélérer son adoption au sein de notre environnement industriel.

Quels bénéfices pourrez-vous tirer de la mise en place des outils *DebiAI* et *Pixano* et quelles sont vos perspectives d'utilisation de ces outils dans le cadre des activités du groupe Renault ?

Les travaux menés autour de la structuration de la donnée, que je suis particulièrement, ont confirmé notre croyance en la valeur de la donnée. Bien avant l'exploitation de solutions de *machine learning*, il est essentiel pour les ingénieries d'adapter leur organisation autour de la culture de la donnée : l'identification, la définition de la valeur, l'appartenance et la gestion de la donnée. Les premières briques technologiques proposées par les outils *DebiAI* et *Pixano* sont très intéressantes car accessibles et disponibles à l'intégration dans plusieurs environnement de travail pour identifier les données d'intérêt, les visualiser et optimiser l'exploitation de ces données. Dans le domaine de l'exploitation de la donnée, nous avons engagé au sein du Manufacturing du groupe Renault un plan d'ambition de visualisation de la donnée industrielle en accès libre, à l'échelle du groupe. Je souhaite que la plateforme du programme *Confiance.ai* nous permette de repousser cette autonomie vers des niveaux plus complexes d'exploitation de la donnée.





Georges Hébrail
Responsable de l'axe scientifique
Science des données et interaction,
IRT SystemX

Comment se caractérise l'intégration du monde académique au sein des projets de R&D de l'IRT SystemX, en particulier sur l'axe « Science des données et interaction » ?

L'une des missions principales de l'IRT SystemX est la création de ponts entre les mondes académiques et industriels, pour accélérer la création de valeur et le déploiement des technologies numériques. Au sein de nos projets de R&D, les laboratoires académiques occupent une place centrale. Ils nous offrent la possibilité de travailler sur des sujets de recherche amont et de lever les verrous scientifiques permettant d'apporter des réponses aux cas d'usage de nos partenaires industriels.

Les laboratoires sont intégrés aux ateliers de montage de nos projets pour contribuer à définir la liste des défis scientifiques à relever. Leur accompagnement se caractérise très souvent par la mise en place et le co-encadrement d'une thèse ou d'un post-doctorat.

En tant que responsable d'axe, mon rôle est d'ajuster au bon niveau le degré d'ouverture au monde académique dans cette phase de montage. L'objectif est de nouer des partenariats avec des laboratoires de pointe dans leur domaine, pour obtenir un état de l'art le plus complet possible pour les secteurs traités. L'axe « Science des données et interaction » est très fortement sollicité depuis quelques années. Le programme IA2 (Intelligence Artificielle et Ingénierie Augmentée) qui hybride les modèles d'IA avec les modèles physiques et les modèles de connaissance, et le programme Confiance.ai, en appui du Grand Défi national « Sécuriser, certifier et fiabiliser les systèmes fondés sur l'intelligence artificielle », ont

généré à eux seuls 79 collaborations académiques et le financement de 18 thèses ou post-doctorats.

Quels sont les dispositifs scientifiques structurants mis en place au sein de l'institut ?

Les actions de la Direction Scientifique de l'institut se déploient sur plusieurs dispositifs :

- La **formation doctorale** est un levier essentiel pour la génération de connaissances sur les domaines adressés par les projets. Le responsable d'axe suit trimestriellement les doctorants rattachés à ses domaines scientifiques. Sur les domaines « Sciences des données et IA » et « Interaction, usages et connaissances » dont je m'occupe, cela concerne une quinzaine de doctorants.
- Dans le but d'élargir le champ scientifique de nos travaux de recherche, nous avons initié en 2020 un nouveau dispositif dénommé « **Recherches exploratoires** ». Mené chaque année à l'initiative des ingénieurs-chercheurs de l'institut et sur fonds propres, il offre la possibilité de mener à bien des recherches amont sur des sujets d'avenir en collaboration avec des partenaires académiques d'excellence.
- Ces recherches exploratoires alimentent également les **feuilles de route des huit domaines scientifiques et technologiques** de l'institut (Science des données et IA, Interaction, usages et connaissances, Calcul scientifique, Optimisation, Ingénierie système, Sécurité de fonctionnement, Sécurité numérique et blockchain et IoT et réseaux). L'objectif de ces feuilles de route est d'identifier nos savoir-faire et de projeter l'institut sur

les compétences scientifiques de demain, facilitant ainsi la résolution des défis prioritaires de nos projets de R&D.

- Une action importante est menée autour des **publications**. Nous avons déjà recensé plus de 640 publications sur HAL, l'archive ouverte universitaire destinée aux articles scientifiques de haut niveau.
- Enfin, nous menons plusieurs actions d'**animation scientifique**, en organisant chaque mois des Seminar@SystemX faisant intervenir des chercheurs extérieurs ou en animant des réseaux scientifiques de grande ampleur, tels que celui du programme Confiance.ai.

De nombreuses activités d'ingénierie de formation ont été mises en place ces dernières années au sein de l'institut. Pouvez-vous nous en parler ?

L'IRT SystemX a développé une offre de formation novatrice, avec l'appui de partenaires académiques d'excellence, baptisée **SystemX Academy**. Son leitmotiv est d'apprendre par la pratique. Ce dispositif de formation propose des modules couplant des volets technologiques positionnés sur les domaines scientifiques et technologiques de l'institut et leurs hybridations, à un volet théorique dispensés par nos partenaires académiques. Cette offre se décline d'une part en interne, avec l'initiative Passport@SystemX dont l'objectif est d'étendre et d'enrichir le socle de compétences de nos ingénieurs-chercheurs. En externe, notre offre s'adresse au monde industriel, en offrant la possibilité de monter en compétences sur des domaines de pointe. Nous avons par exemple mis en place, en collaboration avec l'Université Paris Dauphine-PSL, une offre de formation continue sur la thématique de l'industrie du futur.

Imaginer

le monde numérique de demain



Relever les défis de cybersécurité des systèmes de transport connectés et intelligents

L'IRT SystemX a conçu, en collaboration avec Airbus, Prove&Run, Renault Group, Stellantis et Valeo, une plateforme intitulée « CHES (Cybersecurity Hardening Environment for Systems of Systems) for Automotive ». Son ambition : valider les mécanismes de cyberdéfense des architectures automobiles modernes. Grâce à cette plateforme, l'institut a mis au point une fonctionnalité de détection et de prévention d'intrusion (IDPS : Intrusion Detection and Prevention System).

Cette fonctionnalité est composée de briques logicielles :

- Placées à bord du véhicule, ces briques captent les événements pour détecter les tentatives d'intrusion, décident des actions préventives et avertissent le système d'information du constructeur. Les algorithmes de détection issus de l'apprentissage automatique (*machine learning*) sont complétés par les règles issues de la conception dirigée par les modèles. Ils respectent les contraintes de temps de réponse tout en minimisant la consommation des ressources informatiques embarquées.
- Lorsqu'elles sont intégrées au sein du système d'information du constructeur, ces briques logicielles collectent les avertissements remontés par les véhicules pour accompagner la recherche des causes des incidents grâce à l'exploitation des données historisées (big data).

L'efficacité de cette chaîne logicielle a été validée par une bibliothèque d'attaques dédiée.

Les travaux menés par l'institut ont démontré l'importance des IDPS pour garantir la sécurité et la sûreté de fonctionnement des véhicules. Les résultats de ces travaux sont actuellement en phase d'industrialisation.

« La plateforme CHES for Automotive propose des fonctionnalités avancées de contrôle d'accès et d'isolation et un puissant moteur de détection des attaques connecté à un centre opérationnel de sécurité (Security Operation Center, SOC) pour apporter des réponses concrètes aux incidents de sécurité. »

Witold Klauzel,
Chef de projet, IRT SystemX



INTERVIEW



Blaise Hanczar

Professeur,
Laboratoire IBISC –
Université d'Évry
Paris-Saclay

Pourquoi avez-vous décidé de vous associer avec l'IRT SystemX dans le domaine de la détection d'anomalies pour les systèmes automobiles ?

L'Université d'Évry collabore depuis plusieurs années avec l'IRT SystemX. L'institut offre un environnement collaboratif unique alliant les mondes académiques et industriels et touchant à de nombreux domaines de recherche. C'est dans ce cadre que nous avons souhaité placer notre expertise en *machine learning* au service des approches de détection d'anomalies dans le secteur automobile.

Quels résultats tirez-vous de cette collaboration ?

Intégrer SystemX nous a permis d'échanger avec des experts présentant des compétences et des profils très variés et ainsi d'enrichir nos méthodologies. Les approches de détection d'anomalies développées ont été appliquées de manière très concrète au domaine de la cybersécurité. À plus long terme, nous aurons également la possibilité de les transposer à d'autres secteurs.



Engendrer un double impact sur la science et l'industrie

L'institut a mené, en collaboration avec le Centre de Gestion Scientifique (Mines Paris - PSL), une étude inédite afin de caractériser la nature des relations entre la science et l'industrie organisées et animées par l'IRT SystemX au sein de son écosystème.

Les résultats de cette étude ont permis de caractériser le modèle d'activité de l'IRT SystemX comme un « modèle de recherche à double impact simultané ». Ses projets de R&D produisent simultanément des impacts pour ses partenaires industriels et académiques. Ce travail a rendu visible des formes originales d'activités à la frontière entre la science et l'industrie, progressivement mises au point par l'institut, et centrales au processus de production d'un double impact. Par exemple, SystemX a développé une capacité à identifier des verrous communs à plusieurs partenaires ou encore à faire émerger de nouveaux corpus disciplinaires à explorer et à structurer.

« Les activités de l'IRT SystemX touchent des domaines multidisciplinaires et des thématiques interfilières. L'institut a développé une compétence unique à articuler ces deux dimensions au service des mondes académiques et industriels. »

Patrice Aknin, Directeur scientifique, IRT SystemX



INTERVIEW



Agathe Gilain

Enseignant-chercheur,
Centre de Gestion
Scientifique,
Mines Paris - PSL

Pourquoi avoir placé l'IRT SystemX au cœur d'une étude autour du double impact ?

À l'origine de ce travail, l'IRT SystemX a émis l'hypothèse selon laquelle ses projets de R&D permettraient des interactions entre des partenaires scientifiques et industriels, générant conjointement des avancées scientifiques et industrielles sur des sujets de transformation contemporaine. Or, selon la littérature, de tels « RTO à double impact » sont rares. La plupart d'entre eux se heurtent à la double contrainte que science et industrie peuvent exercer l'une sur l'autre.

Étudier SystemX, son fonctionnement et ses projets, offrait l'opportunité à notre équipe de Mines Paris - PSL avec celle de l'institut, de modéliser à l'aide de la théorie C-K, la façon dont un RTO (*Research and Technology Organisation*) peut produire un double impact multifilières industriel et multidisciplines académiques.

Quels sont les principaux atouts du modèle de recherche de l'institut ?

Pour produire ce double impact, l'IRT SystemX a développé des dispositifs permettant des formes

variées de rapports sciences-industries. Outre l'effort de connaissance exemplaire des disciplines scientifiques et des situations industrielles, ces dispositifs aident à expliciter les inconnus (technologies non encore imaginées, marchés non encore envisagés, connaissances technologiques et scientifiques, marchés indisponibles, etc.) de chaque partenaire, à construire progressivement des inconnus communs à explorer, voire à faire émerger de nouvelles disciplines scientifiques. Ils sont déployés dans des types de projets adaptés à la nature et à l'intensité des inconnus à gérer.

Selon vous, comment ce modèle de recherche à double impact pourra-t-il être amené à évoluer dans les prochaines années ?

Face aux multiples inconnus scientifiques et industriels des transitions contemporaines, la recherche à double impact est un enjeu majeur qui appelle à développer et amplifier les modèles de RTO comme celui de SystemX. Cela peut passer par la diffusion d'outils de pilotage ou par de nouvelles formes de valorisation des connaissances issues des projets.



Planifier les infrastructures et les services de mobilité et de logistique

SystemX a déployé, en collaboration avec MOIA (la marque du groupe Volkswagen dédiée aux nouvelles mobilités), Renault Group et SNCF, des chaînes de simulation visant à dimensionner et à évaluer de nouveaux services de mobilité et de logistique. Les travaux menés ont notamment permis de proposer de nouveaux algorithmes de gestion de flottes de taxis partagés et la consolidation des flux de logistique urbaine.

En s'appuyant sur le framework open source MATSim, les équipes de l'institut ont standardisé la mise en place des simulations multi-agents de transport à large échelle, pour la planification des systèmes de transport. Un modèle de population synthétique pour la France, c'est-à-dire une représentation digitale de la population, a

été créé. Plusieurs cas d'usage menés sur différents territoires (l'Île-de-France, les villes de Lyon, Nantes et Rouen) ont ainsi été instanciés afin de proposer une gestion optimisée d'une flotte de taxis partagés et la mise en place d'une infrastructure pour un service de robots taxis.



Lóránt Tavasszy

Professeur,
TU Delft

À quelles difficultés sont aujourd'hui confrontés les services de livraison du dernier kilomètre ?

Les difficultés pratiques que pose la logistique urbaine en matière de durabilité sont prégnantes pour l'ensemble des acteurs du domaine. De nombreuses craintes existent liées aux embouteillages, aux insuffisances de la couverture de sécurité sociale des livreurs, au manque de sécurité des coursiers à vélo et à la consommation de l'espace public par les livraisons qui provoquent la pollution de l'air. Après la pandémie de Covid-19, le e-commerce a connu une forte croissance avec de nouveaux usages : les services de commandes instantanées, l'envoi collaboratif, la reprise et le retour des produits, ainsi que la livraison omnicanale. Ce contexte a rendu difficile l'enrayement des effets négatifs de la logistique. Toutes ces problématiques sont imbriquées, aucune solution unique n'existe et les instruments politiques sont obsolètes ou inadéquats. Seules des améliorations

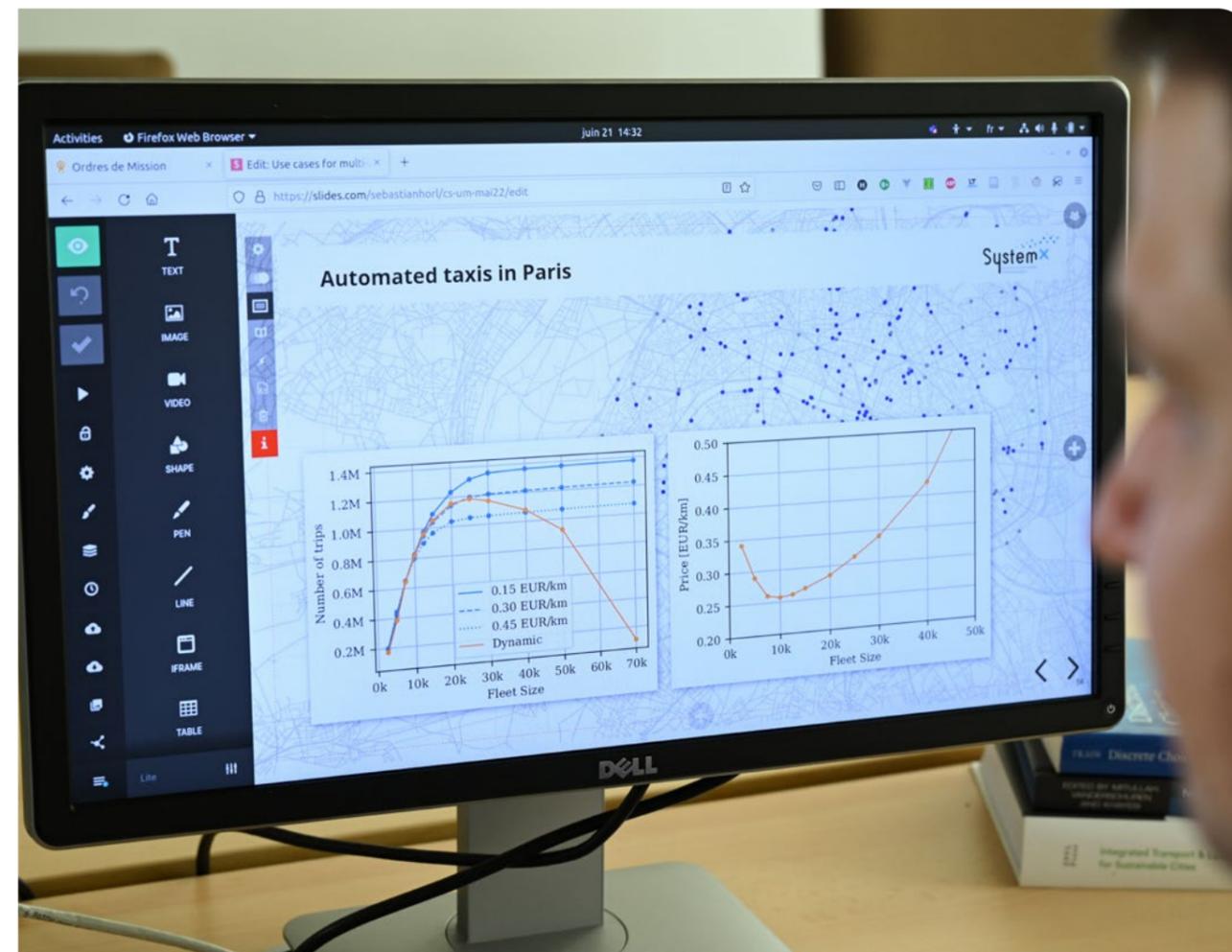
progressives fondées sur des évaluations transparentes et un accord entre l'ensemble des parties prenantes sur les innovations nous permettront d'avancer.

Comment les travaux menés en collaboration avec l'IRT SystemX vous ont permis d'y répondre ?

Pour y remédier, l'IRT SystemX et TU Delft ont œuvré ensemble à la création de jumeaux numériques de la logistique urbaine : des systèmes d'aide à la décision qui mesurent les difficultés rencontrées, les interprètent avec des modèles et proposent des approches de gestion communautaire. Avec les partenaires du consortium LEAD, nous avons développé un jumeau numérique flexible, basé sur une banque de modèles qui peuvent s'appliquer à différents types de villes. Nous sommes maintenant à la moitié du projet et nous allons valider et tester le jumeau numérique sur des laboratoires réels dans différentes villes d'Europe et chez nos partenaires locaux de La Haye et de Lyon.

"Nous avons défini des scénarios de mobilité en adéquation avec la demande réelle et les politiques futures, dans l'optique de concevoir des services de mobilité capables de répondre aux besoins et enjeux énergétiques."

Sebastian Hörll,
Ingénieur-chercheur, IRT SystemX



Eike Bethmann

Head of Strategy,
MOIA GmbH

À quels verrous scientifiques sont aujourd'hui confrontés les opérateurs et services de mobilité ?

Le plus grand défi pour un opérateur de transport à la demande, tel que MOIA, est de déceler les mécanismes sous-jacents de son système de mobilité, en constante évolution. L'objectif est de les conformer aux exigences d'un marché très jeune, réglementé et en pleine mutation. Les véhicules autonomes étant encore une technologie en test, nous nous appuyons fortement sur la simulation et ses analyses pour accompagner notre prise de décision.

Quels bénéfices tirez-vous de votre collaboration avec l'IRT SystemX ?

Le travail commun que nous avons mené avec l'IRT SystemX a permis à notre équipe de simulation de

la mobilité de déployer et d'évaluer des algorithmes d'optimisation de pointe pour la simulation de notre flotte de mobilité à la demande. Cela nous a notamment donné l'opportunité de créer un jumeau numérique de notre service dans le monde réel et d'évaluer différentes conceptions de services, de spécifications de véhicules ou d'implications politiques. Nous avons profité non seulement de l'expérience de l'institut en matière d'algorithmes de répartition à la demande, mais aussi de ses compétences pointues dans le domaine de la mobilité. La spécification et la mise en œuvre de modèles comportementaux réalistes dans notre modélisation de la circulation ont représenté une grande avancée pour nous, afin de mieux comprendre notre service actuel et futur.



Accompagner la conception des pièces et des systèmes mécaniques grâce à l'optimisation topologique

L'IRT SystemX a développé, en collaboration avec le groupe Safran, une plateforme d'optimisation topologique pilotée par la méthode des lignes de niveau : PISCO.

Ce processus outillé novateur permet d'optimiser la forme d'une pièce mécanique à partir d'un cahier des charges défini préalablement (tenue à la rupture, niveaux vibratoires, etc.).

PISCO met en œuvre un processus outillé robuste pour faire évoluer la ligne de niveau d'une pièce mécanique au cours de l'optimisation. Elle permet l'utilisation d'un remaillage conforme à la pièce lors de chaque itération avec un potentiel d'enrichissement important rendant possible l'intégration de nouveaux critères d'optimisation

et de fabrication ainsi que de nouvelles contraintes physiques de performances mécaniques par exemple.

Cette plateforme a été exploitée sur des cas d'usage académiques et industriels. Elle intègre plusieurs fonctionnalités telles que la prise en compte des contraintes de fabrication pour les procédés de type fonderie

et la capacité à gérer les incertitudes liées au cahier des charges des industriels. Elle est en cours de mise en open source et sera accompagnée d'un plan de montée en maturité, pour servir à l'ensemble de la communauté scientifique et pour accompagner au mieux les industriels dans l'intégration de leurs cas d'usage.



Différents algorithmes et méthodes de conception ont été intégrés au sein de la plateforme PISCO afin de proposer un processus outillé robuste. Nos utilisateurs ont ainsi identifié les meilleurs compromis pour optimiser la conception de leurs pièces mécaniques.

Chiara Nardoni,
Ingénieure-chercheuse confirmée
Architecte calcul scientifique,
IRT SystemX



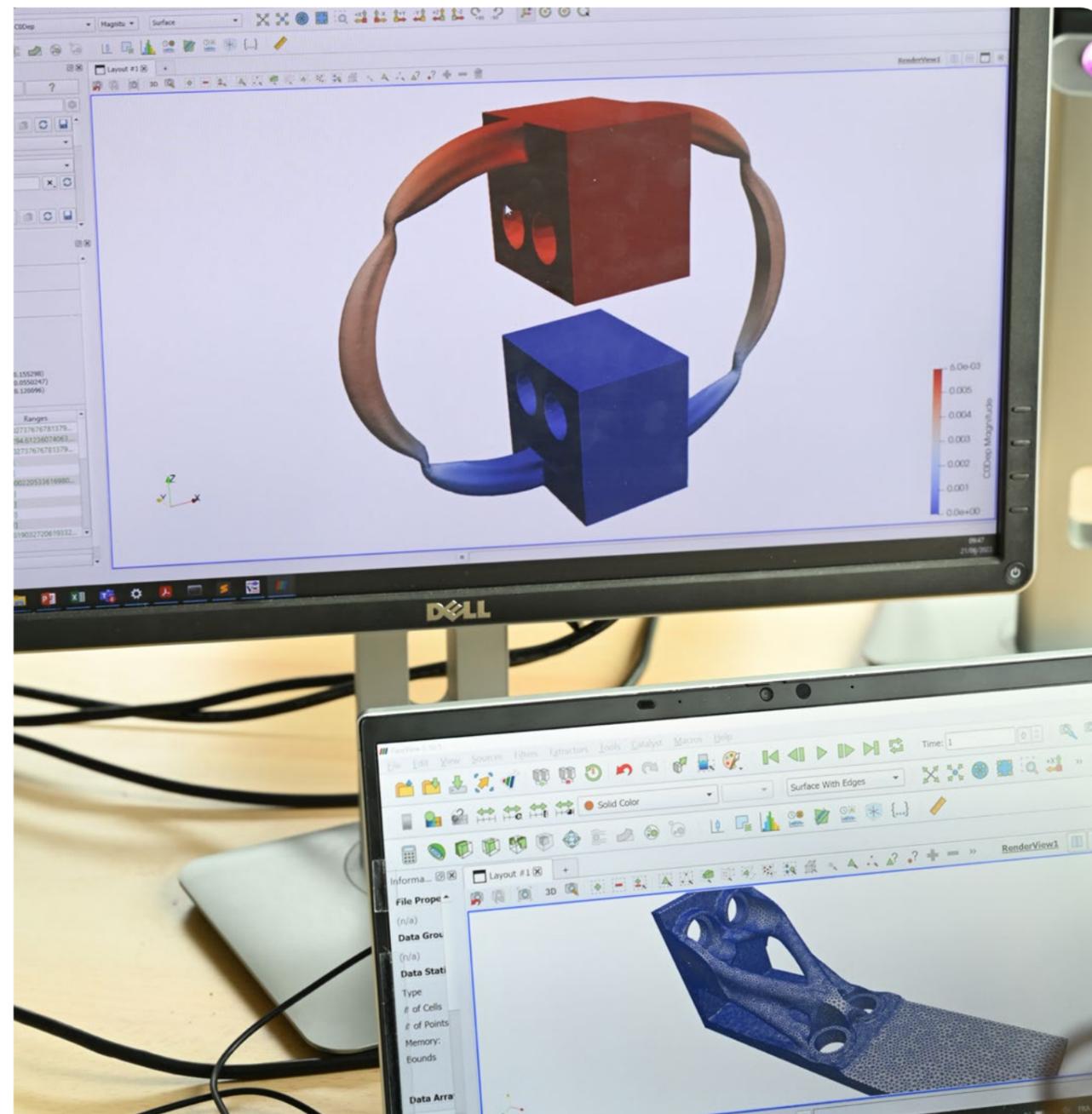
Grégoire Allaire
Professeur,
École polytechnique

Comment la communauté académique s'est-elle mobilisée autour de la création de la plateforme PISCO ?

Lors du projet TOP (Topology Optimization Platform) de l'IRT SystemX, dédié au développement d'outils d'optimisation topologique de structures mécaniques, les partenaires industriels se sont appuyés sur deux laboratoires académiques : le Centre de mathématiques appliquées (CMAP) de l'École polytechnique et le laboratoire Jacques-Louis Lions de Sorbonne Université et de l'Université de Paris Cité. Ces deux laboratoires avaient déjà une longue expérience de collaboration avec les principaux partenaires du projet : Airbus, ESI Group, Renault Group et Safran.

Qu'apportera sa mise en open source au domaine de l'optimisation topologique ?

Au-delà de la perspective de recherches et d'applications nouvelles, le moteur des deux laboratoires académiques investis au sein du projet TOP a été le développement d'une plateforme logicielle open source, qui permette de fédérer une large communauté d'utilisateurs et de développeurs. Les développements numériques lors d'une collaboration demeurent trop souvent restreints à quelques utilisateurs industriels, et il n'est généralement pas possible de réutiliser des briques logicielles pour d'autres applications. La plateforme PISCO va inverser cette tendance et offrir une pérennisation et une maintenance stable de l'implémentation informatique des algorithmes d'optimisation de formes.



Christian Rey
Expert Émérite,
Safran

À quelles problématiques de conception répond la plateforme PISCO ?

En phase de conception amont, la plateforme PISCO rend possible l'optimisation de la forme de diverses pièces mécaniques en tenant compte de cahiers des charges complexes affichant de nombreuses contraintes de fabrication et des exigences de maîtrise des incertitudes des conditions opérationnelles. L'objectif est de répondre à un enjeu stratégique pour le monde industriel : la réduction de la masse des pièces mécaniques. Pour cela, nous optimisons les formes des pièces et nous y intégrons le moins de matière possible, la matière au juste besoin, tout en garantissant la tenue en service.

Que vous a apporté votre collaboration avec l'IRT SystemX ?

La collaboration dans le cadre du projet TOP a permis un fort effet de levier dans le développement de la plateforme PISCO. C'est aussi une ambition partagée de capitalisation et de valorisation accélérée des travaux académiques au meilleur de l'état de l'art grâce à l'interaction avec nos partenaires académiques de renom dans le domaine de l'optimisation de forme pour enrichir cette plateforme. Notre collaboration nous a permis de développer des outils qui nous permettront demain de concevoir plus vite et mieux, en intégrant l'optimisation multi-physique et les contraintes de fabrication additive.



Un cadre propice à la formation doctorale

La formation doctorale est une mission essentielle pour l'IRT SystemX qui propose des travaux de thèse au sein de ses projets de R&D. L'institut permet ainsi à de jeunes titulaires d'un Master et/ou d'un diplôme d'ingénieur de se spécialiser dans un domaine porteur d'avenir avec une première expérience de recherche et de participer à la résolution d'un ou plusieurs verrous scientifiques. Encadrés par des chercheurs ou enseignants-chercheurs de nos laboratoires partenaires et par un ingénieur-chercheur de SystemX, nos doctorants évoluent dans un environnement innovant et dynamique où ils développent une expertise sur un de nos domaines scientifiques et

techniques. Ils se constituent un réseau solide au contact d'acteurs industriels impliqués sur des thématiques comme la mobilité et les transports autonomes, l'industrie du futur, la sécurité et la défense, l'environnement et le développement durable, la santé et le numérique.

Depuis sa création, l'institut a accompagné 53 docteurs et a noué des partenariats structurants avec plusieurs écoles doctorales, comme STIC (Sciences et technologies de l'information et de la communication) et Interfaces de l'Université Paris-Saclay, auprès desquelles SystemX a obtenu le statut d'unité d'accueil.

INTERVIEW



Jeet Desai

Projet de R&D : Topology Optimization Platform (TOP)

Laboratoires partenaires :
Laboratoire Jacques-Louis Lions (Sorbonne Université), Centre de Mathématiques Appliquées (École polytechnique)

Sujet de thèse : Optimisation topologique en mécanique du contact, de la plasticité et de l'endommagement par une méthode de lignes de niveaux
Thèse réalisée entre 2018 et 2021

Que retenir-vous de votre expérience de doctorant à l'IRT SystemX ?

J'ai eu la chance d'intégrer une équipe très accueillante, j'ai bénéficié d'un excellent accompagnement pédagogique et scientifique de la part des équipes de l'institut et des partenaires industriels et académiques. Cette mixité de compétences et de profils a été très enrichissante, j'ai énormément appris.

Quel rôle a joué l'institut pour la suite de votre carrière ?

Suite à l'obtention de mon doctorat, je suis rentré en Inde, mon pays d'origine. J'ai pour ambition de lancer une start-up qui capterait le CO₂ au sein de l'atmosphère. Mon expérience à l'IRT m'a permis d'acquérir des compétences clés dans ce domaine, tant sur les plans scientifiques que techniques.

Quelle est votre plus grande fierté ?

Ma plus grande fierté est d'avoir pu démontrer un nouveau théorème mathématique grâce à l'environnement de l'IRT propice à ce type de recherches.

INTERVIEW



Laura Mariana Reyes Madrigal

Projet de R&D : Human Centered Mobility (HCM) – Chaire Anthropolis

Laboratoire partenaire :
Laboratoire de Génie Industriel, CentraleSupélec - Université Paris-Saclay

Sujet de thèse : Valorisation de la mobilité piétonne dans les solutions de Mobility as a Service (MaaS) : approche de gouvernance et implications pour les politiques publiques
Thèse démarrée en 2020

En quoi consiste votre thèse ?

Ma thèse porte sur l'identification des mécanismes de création de valeur durable dans les solutions de *Mobility-as-a-Service* (MaaS). Il s'agit d'une innovation visant à intégrer l'information et les données des multiples services de mobilité et des infrastructures disponibles dans un territoire, sur une seule plateforme numérique. Cette plateforme permet à l'utilisateur de consulter l'information voyageur en temps réel, de payer et d'accéder aux services qui font partie de l'écosystème de mobilité.

Pourquoi avez-vous décidé d'effectuer votre doctorat à l'IRT SystemX ?

J'ai découvert la chaire Anthropolis grâce à un chercheur de mon ancien laboratoire de recherche, au sein duquel j'effectuais mon stage de Master en transport et mobilité. Réaliser ma thèse à l'IRT SystemX représentait pour moi une opportunité unique d'être en relation avec les mondes de l'innovation et de l'industrie, le tout dans un contexte académique, afin d'effectuer des recherches dans le domaine du MaaS qui me passionne.

Qu'appréciez-vous le plus chez SystemX ?

J'apprécie le cadre de travail offert par l'institut, très accueillant et dynamique. J'aime être entourée de collaborateurs avec des expériences et des profils très différents du mien et qui me poussent à réfléchir autrement.

Accompagner

des parcours remarquables



Des parcours remarquables

Travailler chez SystemX, c'est évoluer au sein d'un creuset d'innovation implanté au cœur du cluster Paris-Saclay, moteur pour le renouveau de l'industrie française et européenne. Nous créons des ponts entre industriels, académiques et institutionnels, et nous menons des projets de recherche technologique partenariale afin d'accélérer la transformation numérique des organisations et de répondre aux grands défis de notre temps. Notre institut est animé par une ambition audacieuse : rendre la France et ses entreprises plus compétitives. Chaque jour, nous développons et nous déployons les technologies du numérique pour dessiner un monde plus sûr, plus performant et plus durable. Découvrez les témoignages de six collaborateurs et alumni qui racontent leurs métiers et leurs parcours au sein de l'institut :



Loïc Cantat

Responsable de l'équipe
Science des données et IA, IRT SystemX



Arnaud Kaiser

Chef de projet, IRT SystemX



Flore Vallet

Chercheuse, IRT SystemX

J'ai travaillé dans le domaine de l'industrie pendant quinze ans avant de me réorienter vers celui de la recherche. J'ai intégré l'IRT SystemX en 2016 en tant que coordinateur de la Direction technique. Je suis manager R&D, Responsable de l'équipe Science des données et IA depuis trois ans et je coordonne également le programme Confiance.ai sur les aspects techniques et scientifiques. Il s'agit d'un programme très structurant au niveau européen. L'institut m'offre la possibilité de me positionner au cœur des évolutions scientifiques et techniques, c'est un lieu de rencontre entre l'industrie et la recherche qui permet d'aborder différemment des sujets comme l'IA.

J'ai intégré l'IRT SystemX en 2014 en tant qu'ingénieur-chercheur, avec une expertise sur les réseaux mobiles sans fil. Mes activités au sein de l'institut m'ont notamment permis de monter en compétences dans le domaine de la cybersécurité des réseaux de communications inter-véhiculaires et de renforcer mes connaissances sur les réseaux véhiculaires. En 2018, j'ai eu l'opportunité d'évoluer vers un poste de chef de projet. L'IRT m'a accompagné, en me permettant notamment de me former à la gestion de projet et au management transversal, compétences clés que je ne possédais pas dans mon bagage universitaire.

Dans le cadre de mon implication au sein de la chaire Anthropolis et du projet IVA (Information Voyageurs Augmentée), j'ai collaboré avec des académiques et des industriels dans des domaines très complémentaires tels que l'optimisation, l'ergonomie ou la sociologie. J'ai également co-encadré trois thèses en lien avec la mobilité depuis 2016. Ces activités constituent un beau tremplin vers l'obtention d'une habilitation à diriger des recherches (HDR). Le cadre de l'institut me permet également de m'ouvrir à des thématiques de recherche centrées sur la conception durable et sur l'utilisateur, liées aux approches de la science des données.



Jeanine Harb

Ingénieure-chercheuse à l'IRT SystemX de 2017 à 2020, aujourd'hui
Senior Data Engineer chez Ubisoft

J'ai rejoint l'IRT SystemX en 2017 pour travailler sur le projet du train autonome en partenariat avec SNCF et Alstom. Je me rends compte aujourd'hui de la portée de ce projet qui avait pour but de reproduire la vision d'un conducteur de train grâce à des algorithmes intelligents. Le projet, à son lancement, démarrait sans sa matière première : les données ! Nous avons équipé un train d'essai avec les capteurs nécessaires, constitué une banque d'images conséquente, développé et optimisé les algorithmes, pour enfin produire notre preuve de concept. J'ai même eu la chance d'ouvrir une partie des images annotées au grand public afin de contribuer à l'effort open data mondial autour de la recherche appliquée. Ce fut une belle aventure ! Grâce à ce projet, j'ai pu appliquer l'IA à un domaine que je ne connaissais pas et c'est cette synergie qu'offre SystemX à celles et ceux qui passent par ses locaux.



Karla Quintero

Architecte ingénierie système,
IRT SystemX

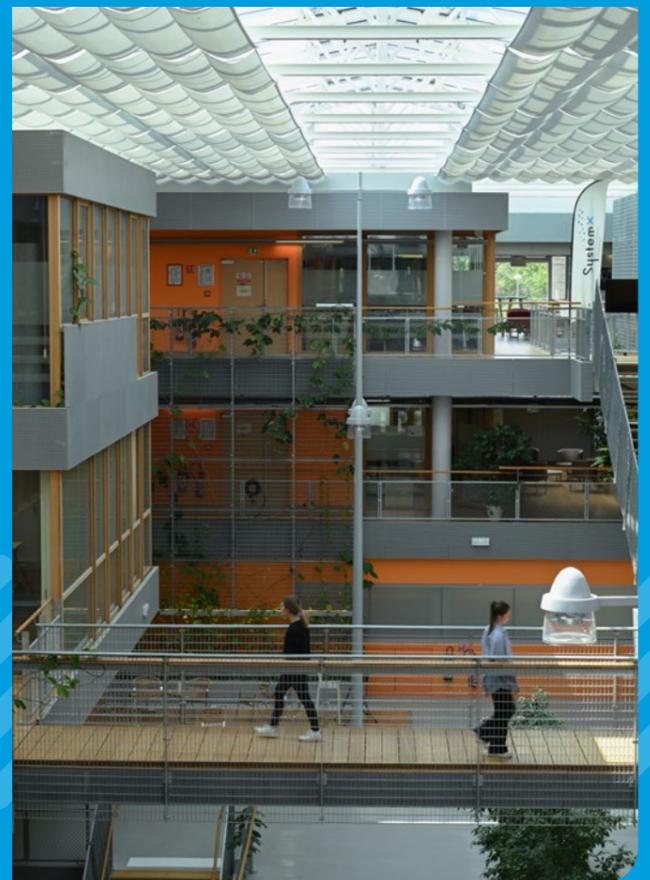
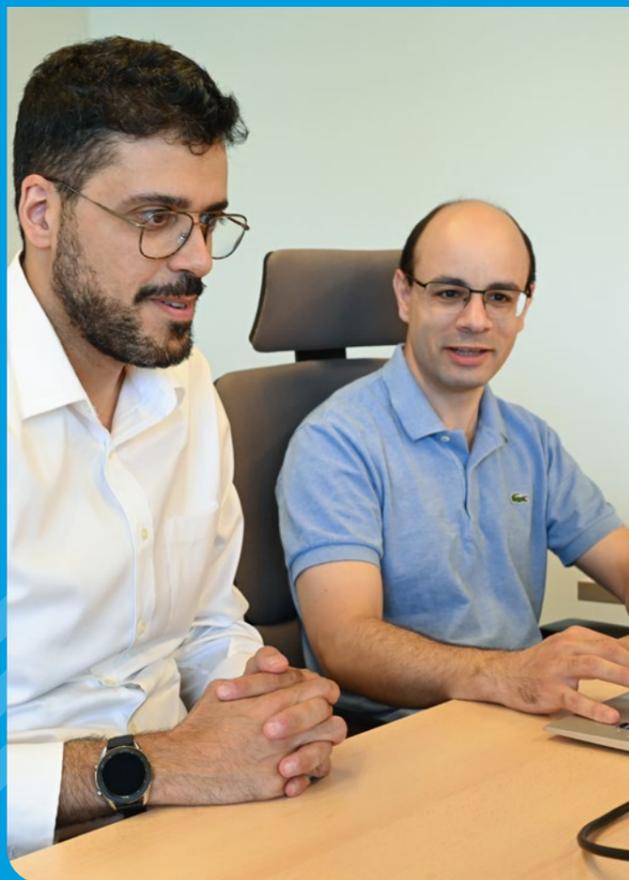
J'ai rejoint l'IRT SystemX en 2020 après cinq années d'expérience dans la recherche automobile. L'institut représente pour moi l'équilibre parfait entre académie et industrie dans la recherche appliquée. SystemX offre un large spectre de possibilités de collaborations et d'évolutions dans différents domaines d'application ce qui est très motivant et enrichissant. Depuis mon arrivée, je me suis impliquée au sein de cinq projets de R&D. Je suis reconnaissante et fière de la culture de coordination, d'encadrement et de collaboration que j'ai pu expérimenter et que j'ai le plaisir de partager avec mes collègues actuellement : produire des travaux de qualité tout en respectant et en valorisant nos ressources et nos valeurs humaines.



Andreas Hein

Architecte système et Ingénieur-chercheur confirmé à l'IRT SystemX de 2020 à 2021, aujourd'hui Professeur et chef d'équipe ingénierie système à l'Université du Luxembourg

L'IRT SystemX m'a donné l'opportunité de combiner à la fois des activités de recherche et des activités plus applicatives, dans les domaines de l'ingénierie système et de l'architecture système. J'ai eu l'occasion d'être intégré au sein même d'une équipe chez un partenaire industriel en tant qu'architecte système ; cette expérience m'a permis d'acquérir de solides connaissances des défis de l'ingénierie système pour ensuite identifier les sujets de recherche avec un fort impact. L'institut m'a apporté un grand soutien en me permettant de mener un projet de recherche exploratoire dans le domaine de l'instanciation d'architectures de référence. Cette expérience m'a beaucoup appris et a constitué un véritable tremplin pour la suite de ma carrière au sein de l'Université du Luxembourg, que j'ai intégré en 2021 en tant que professeur et chef d'équipe ingénierie système.



Directeur de publication : Michel Morvan
Directrices de rédaction : Aurélie Bourrat, Catherine Dorr
Rédactrice en chef : Julie Bernede
Co-rédactrices : Samanta Duguay, Clara Lê, Agathe Leonard
Coordination : Bruno Foyer
Crédits photo :
Gil Lefauconnier/IRT SystemX, Thierry Fournier, Shutterstock
Conception visuelle : www.maiffret.net
Impression : Burler Graphics



